

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCIANO ANTUNES DA ROZA

MODIFICAÇÕES OCORRIDAS EM CULTIVARES DE SOJA DO TIPO DE CRESCIMENTO  
DETERMINADO CULTIVADAS NO SUL DO BRASIL

CURITIBA

2017

LUCIANO ANTUNES DA ROZA

MODIFICAÇÕES OCORRIDAS EM CULTIVARES DE SOJA DO TIPO DE CRESCIMENTO  
DETERMINADO CULTIVADAS NO SUL DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do  
Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná,  
como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em  
Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti  
Co-orientador: Prof. Dr. Adilson de Oliveira Junior  
Co-orientador: Prof. Dr Milton Ferreira de Moraes

CURITIBA

2017

R893m

Roza, Luciano Antunes da  
Modificações ocorridas em cultivares de soja do tipo de crescimento determinado cultivadas no Sul do Brasil / Luciano Antunes da Roza. - Curitiba, 2019.  
69 p.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.  
Orientador: Volnei Pauletti  
Coorientador: Adilson de Oliveira Junior  
Coorientador: Milton Ferreira de Moraes

1. Soja - Paraná. 2. Plantas - melhoramento genético. 3. Fisiologia vegetal. 4. Morfologia vegetal. I. Pauletti, Volnei (Orientador). II. Oliveira Junior, Adilson de (Coorientador). III. Moraes, Milton Ferreira de (Coorientador). IV. Título. V. Universidade Federal do Paraná.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO  
Mestrado e Doutorado



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de Luciano Antunes da Roza, intitulada: **"Modificações ocorridas em cultivares de soja do tipo de crescimento determinado cultivadas no Sul do Brasil"**, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela **"APROVAÇÃO"** da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 17 de fevereiro de 2017.

Prof. Dr. Vonei Pauletti, Presidente

Dr. Adilson de Oliveira Junior, Iº. Examinador

Prof. Dr. Antonio Carlos Vargas Motta, IIº. Examinador

Prof. Dr. João Carlos Bessalho Filho, IIIº. Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

Aos meus pais Ilete e João, e tios Rosa e José Maria pelo apoio e suporte.

Ao Prof. Dr. Volnei e Aos co-orientadores Adilson e Milton pela orientação, conversas, ensinamentos, incentivo, apoio e suporte para o desenvolvimento do projeto.

Aos amigos, por compartilharem momentos marcantes na caminhada.

À Coodetec, TMG, Grupo Slaviero, BAG Embrapa Soja e Total Biotecnologia pela ajuda e apoio na realização do experimento.

Ào Laboratório da Embrapa Soja pela contribuição à realização das análises.

À CAPES pela concessão da bolsa.

Aos que auxiliaram em algum momento nessa caminhada.

À todos muito obrigado.

“...Cada pessoa levando um destino  
Cada destino levando um sonho  
E sonhar é a arte da vida...”

Almir Sater e Renato Teixeira

## RESUMO

No Brasil, a cultura da soja vem apresentando em incrementos médios anuais de 29 kg ha<sup>-1</sup>, ocasionado pelas modificações no melhoramento genético e manejo. Onde o melhoramento genético representa até 67 % dos ganhos de produtividade e o restante causado pelo manejo. Entretanto, a influência do melhoramento genético nas características morfológicas, fisiológicas e nutricionais das cultivares de soja ao longo dos anos não está clara. Diante disso, o objetivo geral do trabalho foi avaliar as modificações morfológicas, fisiológicas e nutricionais de cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivadas no Sul do Brasil nos últimos 76 anos. Para tanto, o trabalho está composto por dois capítulos, que buscam descrever (i) as alterações morfológicas, componentes de rendimento e partição de matéria seca de cultivares de soja cultivadas de 1940 à 2016 no Sul do Brasil, e (ii) as modificações fisiológicas, nutricionais e qualidade do grão de soja proporcionadas de diversos programas de melhoramento genético. O experimento foi realizado em casa de vegetação na Universidade Federal do Paraná, consistindo na comparação de 22 cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil, com cinco repetição, sob delineamento de blocos ao acaso. Os parâmetros fisiológicos avaliados consistiram de clorofila a e b, carotenoide e atividade enzimática da redutase do nitrato e urease. As plantas foram colhidas na maturidade fisiológica, com exceção das folhas que foram coletadas conforme senesciam, e divididas em folha, haste, vagem e grão. Em conjunto à colheita, se determinou os componentes de rendimento e os parâmetros morfológicos. Posteriormente, avaliou o teor de óleo e proteína no grão e com a concentração de nutrientes determinou a extração, exportação, índice de partição e a eficiência de absorção radicular e utilização de nutrientes. As cultivares demonstraram redução em 50 % de área foliar por planta. O incremento no índice de colheita de grão foi compensado pela redução da matéria seca de raiz. O rendimento planta<sup>-1</sup> foi controlado pelo número de grão planta<sup>-1</sup>, vagem planta<sup>-1</sup>, nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> e nó planta<sup>-1</sup>. O teor de clorofila a e b e atividade enzimática da redutase do nitrato e urease não tiveram alteração ao longo do período analisado. A concentração, conteúdo, partição e eficiência de absorção radicular e de utilização de nutrientes tiveram modificações nas diversas partes da planta proporcionadas pelo melhoramento genético. A concentração de óleo e proteína do grão de soja não evidenciou influência com a seleção de cultivares para alta produtividade, mas tendo relação negativa entre esses dois parâmetros. Conclui-se que o foco do melhoramento na seleção de cultivares para altos rendimentos, em conjunto com as alterações no manejo, promoveu modificações morfológicas, fisiológicas e nutricionais relevantes no cenário da soja no Brasil.

Palavras-chave: Evolução. *Glycine max*. Nutriente. Rendimento. Partição.

## ABSTRACT

In Brazil, the soybean crop is presented in annual average increments of 29 kg ha<sup>-1</sup>, caused by the modifications in the genetic improvement and management. Where genetic improvement represents up to 67% of productivity gains and the remainder caused by management. However, the influence of genetic improvement on the morphological, physiological and nutritional characteristics of soybean cultivars over the years is not clear. The objective of this work was to evaluate the morphological, physiological and nutritional changes of soybean cultivars (*Glycine max* (L.) Merr.) Cultivated in southern Brazil in the last 76 years. In order to do so, the work is composed of two chapters, which seek to describe (i) the morphological changes, yield components and dry matter partition of soybean cultivars cultivated from 1940 to 2016 in southern Brazil, and (ii) physiological modifications, Nutritional and soybean quality provided by various breeding programs. The experiment was carried out in a greenhouse at the Federal University of Paraná, consisting of 22 cultivars of soybean cultivated in southern Brazil, with five replications, under a randomized block design. The physiological parameters evaluated consisted of chlorophyll a and b, carotenoid and enzymatic activity of nitrate reductase and urease. The plants were harvested at physiological maturity, except for the leaves that were collected according to senescence, and divided into leaf, stem, pod and grain. Together with the harvest, the yield components and the morphological parameters were determined. Afterwards, it evaluated the oil and protein content in the grain and with the concentration of nutrients determined the extraction, export, partition index and the efficiency of root absorption and nutrient utilization. The cultivars showed a 50% reduction in leaf area per plant. The increase in the grain harvest index was compensated by the reduction of root dry matter. Yield plant<sup>-1</sup> was controlled by the number of grain plant<sup>-1</sup>, pod plant<sup>-1</sup>, reproductive node plant<sup>-1</sup> and node plant<sup>-1</sup>. The content of chlorophyll a and b and the enzymatic activity of nitrate and urease reductase did not change during the analyzed period. The concentration, content, partition and efficiency of root absorption and nutrient utilization have changed in the various parts of the plant provided by genetic improvement. The concentration of soybean oil and protein did not show influence with the selection of cultivars for high productivity, but with negative relation between these two parameters. It is concluded that the focus of the improvement in the selection of cultivars for high yields, together with the changes in the management, promoted morphological, physiological and nutritional modifications relevant in the soybean scenario in Brazil.

Keywords: Evolution. *Glycine max*. Nutrient. Yield. Partition.



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>MODIFICAÇÕES MORFOLÓGICAS E COMPONENTES DE RENDIMENTO DE CULTIVARES DE SOJA CULTIVADAS NO SUL DO BRASIL .....</b>	<b>5</b>
2.1	RESUMO .....	5
2.2	ABSTRACT .....	6
2.3	INTRODUÇÃO .....	7
2.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	8
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	11
2.5.1	Parâmetros morfológicos.....	11
2.5.2	Componente de rendimento .....	13
2.5.3	Análise de trilha do rendimento e componente de rendimento .....	16
2.6	CONCLUSÕES.....	18
	REFERÊNCIAS .....	19
<b>3</b>	<b>MODIFICAÇÕES FISIOLÓGICAS E NUTRICIONAIS DE CULTIVARES DE SOJA CULTIVADAS NO SUL DO BRASIL.....</b>	<b>23</b>
3.1	RESUMO .....	23
3.2	ABSTRACT .....	24
3.3	INTRODUÇÃO .....	25
3.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	26
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
3.6	CONCLUSÕES.....	45
	REFERÊNCIAS .....	45
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS GERAL .....</b>	<b>50</b>
	<b>APÊNDICE 1 - MORFOLOGIA DAS CULTIVARES NO PERÍODO VEGETATIVO DE SOJA CULTIVADO NO SUL DO BRASIL.....</b>	<b>56</b>

APÊNDICE 2 - ESTRUTURA DAS CULTIVARES DE SOJA CULTIVADAS NO UL DO BRASIL.....	58
--	----

## 1. INTRODUÇÃO

A soja no Brasil possui relatos desde 1882, no estado da Bahia (D'UTRA, 1882). Porém na região Sul do país, o primeiro relato ocorreu somente em 1901, no município de Dom Pedrito - RS (MAGALHÃES, 1987). Inicialmente o cultivo ocorria nas pequenas propriedades para alimentação animal (KASTER et al., 1981). Os cultivos comerciais se iniciaram na safra 1940/41 no Rio Grande do Sul e no Paraná e Santa Catarina a partir de 1951/52, com produtividade média de 651, 741 e 1275 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (BONATO; BONATO, 1987).

Desde o início dos cultivos comerciais, a cultura teve várias mudanças no manejo (plantio direto, fungicida, herbicida, inseticida, adubação, espaçamento, densidade de plantio, entre outros) e cultivares (hábito de crescimento, ciclo de desenvolvimento e período juvenil). Essas melhorias deram suporte aos incrementos de produtividade, que na média brasileira da safra 2015/16 atingiu 2870 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2016). Portanto, levando em consideração a média dos primeiros cultivos comerciais, representa acréscimos anuais de 29 kg ha<sup>-1</sup> na produtividade de grão. Trabalhos na literatura obtiveram valores que até 67 % desses ganhos são oriundos do melhoramento genético (FELIPE et al., 2013; SPECHT et al., 2014).

Há relatos de ganhos na produtividade de grão de até 71,3 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (USTUN et al., 2001; JIN et al., 2010; RAMTEKE et al., 2011; ROGERS et al., 2015) dependendo do programa de melhoramento, tratos culturais, grupo de maturação, local e período de avaliação. A produtividade apresenta relação com alguns componentes de rendimento, podendo por meio dos componentes de rendimento, a seleção indireta de cultivares com maiores rendimentos. Relatos mostram que o rendimento teve correlação com a quantidade de grão m<sup>-2</sup>, vagem m<sup>-2</sup> e nó reprodutivo m<sup>-2</sup> (KAHLON et al., 2011). Porém, foi encontrada relação da produtividade com o tamanho de semente (CUI; YU, 2005; JIN et al., 2010; RAMTEKE et al., 2011), quantidade de semente (De BRUIN; PEDERSEN, 2009; JIN et al., 2010; RAMTEKE et al., 2011). Desse modo, demonstrando que não está claro os componentes de rendimento que influenciam a produtividade, apresentando influência do local, período, germoplasma e hábito de crescimento das cultivares de soja

A seleção de cultivares para alta produtividade indiretamente optou pelas com os maiores incrementos de matéria seca, interceptação luminosa e eficiência na conversão de energia luminosa (KOESTER et al., 2014). Com esse foco e em conjunto com as alterações no manejo, o melhoramento genético desenvolveu cultivares com menor área foliar (MORRISON et al., 1999; Jin et al., 2010), altura (WILCOX; MERR, 2001; JIN et al., 2010; RAMTEKE et al., 2011), número de ramos, cultivares compactas (LI et al., 2013) e maior índice de colheita de grão (JIN et al., 2010;

KOESTER, 2014). A literatura possui resultados controversos relacionados à altura, sendo que alguns trabalhos não tiveram mudança (ROGERS et al., 2015) e outros relatam variações na altura em determinados períodos (USTUN et al., 2001). Assim como, os resultados sobre o índice de colheita de grão são confusos, segundo Jin et al. (2010), no período de 56 anos, o índice incrementou de 0,31 para 0,38. Porém, o IC da biomassa de 0,37 já foram obtidos por Hammond et al. (1951) e Bataglia et al. (1976), com as cultivares antigas.

A influência do melhoramento genético no ciclo de nutriente nas plantas não está esclarecida, apresentando poucos trabalhos sobre o tema. Esses trabalhos descrevem que as cultivares modernas aumentou a produção de biomassa e grãos resultando em incrementos na extração e exportação dos nutrientes essenciais, exceto magnésio, boro e ferro (Bender et al., 2015). A concentração de nitrogênio na planta pode ser influenciada pela atividade da enzima redutase do nitrato, responsável pela assimilação do nitrogênio, que ocorre em sua maioria na folha (HATAM; HUME, 1976), com a máxima atividade no período de florescimento (Thibodeau e Jaworski, 1975; HATAM; HUME, 1976). Assim como, a atividade da enzimática da urease que realiza a quebra do ureídeo em  $\text{CO}_2/\text{NH}_3$  (Todd e Polacco, 2004), tendo o pico de atividade durante o enchimento de grão (POLACCO; SPARKS, 1982), resultando em modificações no ciclo do nitrogênio na planta (HOLLAND et al., 1987).

Os grãos de soja apresentam altos teores de proteína (330 e 455 g  $\text{kg}^{-1}$ ), e óleo (157 a 242 g  $\text{kg}^{-1}$ ) (JIN et al., 2010; HOUX et al., 2014; BRANCALIAO et al., 2015; ROGERS et al., 2015). Rogers et al. (2015) trabalhando com cultivares ao longo de 80 anos, concluiu que houve correlação negativa entre proteína e óleo, enquanto o óleo obteve ganho de 0,16 g  $\text{kg}^{-1} \text{ano}^{-1}$ , a proteína diminuiu em 0,17 g  $\text{kg}^{-1} \text{ano}^{-1}$ . Porém, em alguns relatos não se observou essa tendência no teor de óleo e proteína nos grãos (JIN et al., 2010; HOUX et al., 2014; BRANCALIAO et al., 2015), por terem influência do ambiente, manejo e genótipo.

Diante dessas incertezas, o objetivo geral do trabalho foi avaliar as modificações morfológicas, fisiológicas e nutricionais de cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivadas no Sul do Brasil nos últimos 76 anos. Para tanto, o trabalho está composto por dois capítulos, que buscam descrever (i) as alterações morfológicas, componentes de rendimento e partição de matéria seca de cultivares de soja cultivadas de 1940 à 2016 no Sul do Brasil, e (ii) as modificações fisiológicas, nutricionais e qualidade do grão de soja proporcionadas de diversos programas de melhoramento genético.

## REFERÊNCIAS

- BATAGLIA, O. C.; MASCARENHAS, H. A. A.; TEIXEIRA, J. P. F.; TISSELI F. °, O. Acúmulo de matéria seca e nutrientes, em soja cultivar Santa-Rosa. **Bragantia**, v. 35, n. 2, p. 237–247, 1976.
- BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern Soybean Varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563–573, 2015.
- BONATO, EMÍDIO RIZZO; BONATO, A. L. V. B. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1987.
- BRANCALIÃO, S. R.; AGUIAR, A. T. D. E.; LIMONTA, C. R.; ROSSI, C. E.; CRISTOVÃO, N. N. Grain Yield and Composition of Soybean Crop After the Supply of Nitrogen With the Use of Cover Crops At Direct Sowing. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 69–75, 2015.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Décimo Segundo levantamento/agosto de 2016**. v.3, n. 11, p. 171.
- CUI, S. Y.; YU, D. Y. Estimates of relative contribution of biomass, harvest index and yield components to soybean yield improvements in China. **Plant Breeding**, v. 124, n. 5, p. 473–476, 2005.
- D'UTRA, G. Soja. **Jornal do agricultor**, v. 7, n. Rio de Janeiro, p. 185–188, 1882.
- DE BRUIN, J. L.; PEDERSEN, P. Growth, yield, and yield component changes among old and new soybean cultivars. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 1, p. 124–130, 2009.
- FELIPE, M. DE; GERDE, J. A.; ROTUNDO, J. L. Soybean Genetic Gain in Maturity Groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. **Crop Science**, v. 12, p. 11–12, 2016.
- HATAM, M.; HUME, D. J. Relations Between Nitrate Reductase Activity and Nitrogen Accumulation in Soybeans. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 56, n. 2, p. 377–384, 1976.
- HOLLAND, M. A.; GRIFFIN, J. D.; ELISE MEYER-BOTHLING, L.; POLACCO, J. C. Developmental genetics of the soybean urease isozymes. **Developmental Genetics**, v. 8, n. 5–6, p. 375–387, 1987.
- HOUX, J. H.; WIEBOLD, W. J.; FRITSCHI, F. B. Rotation and tillage affect soybean grain composition , yield , and nutrient removal. **Field Crops Research**, v. 164, p. 12–21, 2014.
- JIN, J.; LIU, X.; WANG, G.; et al. Agronomic and physiological contributions to the yield improvement of soybean cultivars released from 1950 to 2006 in Northeast China. **Field Crops Research**, v. 115, n. 1, p. 116–123, 2010.
- KAHLON, C. S.; BOARD, J. E.; KANG, M. S. An Analysis of Yield Component Changes for New vs. Old Soybean Cultivars. **Journal of Crop Improvement**, p. 13–22, 2011.
- KASTER, M.; QUEIROZ, E. F.; TERESAWA, F.; DOLDATELLI, D. Introdução e evolução da soja no Brasil. 4. No Estado do Paraná. In: Miyasaka, S.; Medina, J. C. (Ed.). **A soja no Brasil**. 1st ed. Campinas: São Paulo; 1981. p.22-24.

KOESTER, R. P.; SKONECZKA, J. A.; CARY, T. R.; DIERS, B. W.; AINSWORTH, E. A. Historical gains in soybean (*Glycine max* Merr.) seed yield are driven by linear increases in light interception, energy conversion, and partitioning efficiencies. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 12, p. 3311–3321, 2014.

MAGALHÃES, C. M. Introdução e evolução da soja no Brasil: no estado do Rio Grande do Sul. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Ed.). **A soja no Brasil**. 1<sup>st</sup> ed. Campinas: São Paulo; 1981. p.18-20.

POLACCO, J. C.; SPARKS, R. B. Patterns of urease synthesis in developing soybeans. **Plant physiology**, v. 70, p. 189–194, 1982.

RAMTEKE, R.; GUPTA, G. K.; MURLIDHARAN, P.; SHARMA, S. K. Genetic progress of soybean varieties released during 1969 to 2008 in India Genetic progress of soybean varieties released during 1969 to 2008. **Indian Journals**. n. August 2015, 2011.

ROGERS, J.; CHEN, P.; SHI, A.; et al. Agronomic performance and genetic progress of selected historical soybean varieties in the southern USA. **Plant Breeding**, v. 134, n. 1, p. 85–93, 2015.

SPECHT, J. E.; DIERS, B. W.; NELSON, R. L.; FRANCISCO, J.; TOLEDO, F.; TORRION, J. A.; GRASSINI, P. Soybean. In: SMITH, S.; DIERS, B.; SPECHT, J.; CARVER, B. (Ed.). **Yield gains in major U.S. field crops**. CSSA special publication 33. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. 2014. p. 311–356.

THIBODEAU, P. S.; JAWORSKI, E. G. Patterns of nitrogen utilization in the soybean. **Planta**, v. 127, n. 2, p. 133–147, 1975.

TODD, C. D.; POLACCO, J. C. Soybean cultivars “Williams 82” and “Maple Arrow” produce both urea and ammonia during ureide degradation. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 398, p. 867–877, 2004.

USTUN, A.; ALLEN, F. L.; ENGLISH, B. C. Genetic progress in soybean of the U.S. Midsouth. **Crop Science**, v. 41, n. 4, p. 993–998, 2001.

## 2 MODIFICAÇÕES MORFOLÓGICAS E COMPONENTES DE RENDIMENTO DE CULTIVARES DE SOJA CULTIVADAS NO SUL DO BRASIL

### 2.1 RESUMO

No Brasil, a cultura da soja tem aumentado a produtividade em aproximadamente  $29 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , devido a fatores genéticos e ambientais, não estando clara a contribuição de cada um destes fatores. O objetivo deste trabalho foi determinar as alterações proporcionadas pelo melhoramento genético nas características morfológicas e partição de matéria seca nas cultivares de soja cultivadas nos últimos 76 anos no sul do Brasil, que possam ter influenciado na produtividade da cultura. Com isso, se realizou um experimento em casa de vegetação com 22 cultivares de soja lançadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. As cultivares foram escolhidas levando em consideração a época de introdução ou registro no Brasil, rendimento e representatividade em área de cultivo no Sul do Brasil, sendo as grãos obtidas do banco ativo de germoplasma da Embrapa Soja, Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola e Tropical Melhoramento & Genética. Foi avaliado as características morfológicas das plantas e os componentes de rendimento. Realizou análise de regressão entre os dados obtidos e ano de lançamento, e correlação e análise de trilha entre os componentes de rendimento e destes com o rendimento. A área foliar diminuiu em  $\sim 50 \%$  durante o período de análise, mas sem mudanças na altura e ramo planta<sup>-1</sup>. O aumento do índice de partição de grão, ou índice de colheita, indica que as cultivares estão sendo mais eficientes para formarem matéria de grão, mas em compensação reduziu o índice de partição da raiz. O rendimento planta<sup>-1</sup> diminuiu em  $0,1 \text{ g planta}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , mas sem relação da quantidade e tamanho de grão com o ano de lançamento. O rendimento planta<sup>-1</sup> foi controlado pelo número de grão planta<sup>-1</sup>, vagem planta<sup>-1</sup>, nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> e nó planta<sup>-1</sup>. A evolução da produtividade de grãos da soja no sul do Brasil está associada com o melhoramento genético e manejo da cultura, onde o melhoramento genético não propiciou aumento de rendimento planta<sup>-1</sup>, mas condições para obter maiores produtividades em conjunto com o manejo das lavouras.

**Palavras chave:** partição, melhoramento genético, raiz, *Glycine max*.

## 2.2 ABSTRACT

In Brazil, soybean yield has increased productivity by about  $29 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , due to genetic and environmental factors, and the contribution of each of these factors is unclear. The objective of this work was to determine the changes brought about by genetic improvement in the morphological characteristics and dry matter partition in soybean cultivars grown in the last 76 years in southern Brazil, which may have influenced crop productivity. Thus, a greenhouse experiment was carried out with 22 soybean cultivars launched in the South of Brazil from 1940 to 2016. The cultivars were chosen taking into account the time of introduction or registration in Brazil, yield and representativity in growing area in the Southern Brazil, being the grains obtained from the active germplasm bank of Embrapa Soja, Central Cooperative of Agricultural and Tropical Research Improvement & Genetics. The morphological characteristics of the plants and the yield components were evaluated. It performed a regression analysis between the data obtained and the year of launch, and correlation and path analysis between the yield components and those with the yield. The leaf area decreased by  $\sim 50\%$  during the analysis period, but without changes in height and branch  $\text{plant}^{-1}$ . The increase of the grain partition index, or harvest index, indicates that the cultivars are being more efficient to form grain matter, but in compensation reduced the root partition index. The yield of  $\text{plant}^{-1}$  decreased by  $0.1 \text{ g plant}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , but without relation of the quantity and grain size with the year of release.  $\text{Plant}^{-1}$  yield was controlled by the number grain of  $\text{plant}^{-1}$ , pod  $\text{plant}^{-1}$ , reproductive node  $\text{plant}^{-1}$  and node  $\text{plant}^{-1}$ . The evolution of soybean grain yield in southern Brazil is associated with genetic improvement and crop management, where genetic improvement did not lead to increased yield  $\text{plant}^{-1}$ , but conditions to obtain higher yields in conjunction with crop management.

Keywords: partition, genetic improvement, root, Glycine max.



### 2.3 INTRODUÇÃO

A soja possui registros no Brasil desde 1882 no estado da Bahia (D'UTRA, 1882). Entretanto, o primeiro registro de cultivo comercial consiste da safra de 1940/41, e desde então a produtividade média brasileira incrementou de 651 kg ha<sup>-1</sup>, do primeiro registro, para 2870 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2015/16 (BONATO; BONATO, 1987; CONAB, 2016), representando acréscimo de ~29 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Os ganhos de produtividade chegam a 71,5 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (BOERMA, 1979; ALLIPRANDINI, 1993; WILCOX; MERR, 2001; EGLI, 2008; LANGE; FEDERIZZI, 2009; KAHN et al., 2011; KAHN; BOARD, 2012), dependendo do programa de melhoramento, tratos culturais, grupo de maturação, local e período de avaliação.

Esses acréscimos no rendimento foram ocasionados por modificações nos fatores genéticos e ambientais. O fator genético, correspondente ao melhoramento genético, contribui com até 67 % dos ganhos na produtividade (FELIPE et al., 2013; SPECHT et al., 2014), sendo o restante oriundo pelas alterações ambientais como densidade de plantio, sistema de produção e fertilidade do solo (ROWNTREE et al., 2013; SUHRE et al., 2014; WILSON et al., 2014). O rendimento é resultado da taxa de crescimento da cultura e componentes de rendimento (KAHN et al., 2011), sendo que a taxa de crescimento da cultura depende do acúmulo de biomassa, interceptação da luminosidade e área foliar (CONNOR et al., 2011) e os componentes de rendimento são parâmetros morfológicos cruciais para determinar o rendimento (Egli, 1998).

O melhoramento genético proporcionou alterações nas plantas que direta e indiretamente resultaram em maiores taxas de crescimento da soja. Koester et al. (2014) mostraram que as cultivares modernas tem maior acúmulo de biomassa, eficiência na conversão da energia luminosa em biomassa e interceptação da luminosidade em comparação com as cultivares antigas. Além disso, o melhoramento genético selecionou cultivares com menor área foliar (MORRISON et al., 1999; JIN et al., 2010), altura (WILCOX; MERR, 2001; JIN et al., 2010; RAMTEKE et al., 2011), número de ramos e cultivares compactas (LI et al., 2013). Porém, alguns trabalhos tem resultados contrários, demonstrando redução e incrementos dependendo do período analisado (USTUN et al., 2001) e incremento da área foliar (PEDERSEN; LAUER, 2004b). Alguns trabalhos recentes identificaram que as cultivares modernas de soja apresentam índice de colheita superior às cultivares antigas (JIN et al., 2010; KOESTER et al., 2014).

Cultivares de soja com maiores rendimentos podem ser selecionadas pelos componentes de rendimento. Kahn et al. (2011) obtiveram que a quantidade de grão m<sup>-2</sup>, vagem m<sup>-2</sup> e nó reprodutivo m<sup>-2</sup> foram os principais componentes de rendimento relacionados com o rendimento. Outros encontraram relação do rendimento com grão vagem<sup>-1</sup> (DE BRUIN; PEDERSEN, 2009) e tamanho de grão (CUI; YU, 2005). Entretanto, Boerma (1979) não encontrou relação do rendimento

com vagem  $\text{m}^{-1}$ . Então os componentes de rendimento que influenciam no rendimento ainda não estão bem claros (BALL et al., 2001; PEDERSEN; LAUER, 2004a; KAHN et al., 2011), apresentando alterações dependendo do local, período, germoplasma e hábito de crescimento das cultivares (PERINI et al., 2012).

Por meio das incertezas relacionadas às características morfológicas, índice de partição da matéria seca e componentes de rendimento, este trabalho teve como objetivos específicos (1) identificar as características morfológicas que foram alteradas nas cultivares de soja adaptadas ao Sul do Brasil, (2) comparar partição da matéria seca e sua eficiência na produção de grão, (3) identificar os componentes de rendimento que foram modificados entre as cultivares novas e antigas e (4) verificar os componentes de rendimento que possuem maior relação com o rendimento de grão. Esses objetivos foram atendidos comparando cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016 em avaliação na casa de vegetação.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Universidade Federal do Paraná (UFPR) no Setor de Ciências agrárias, nas coordenadas  $25^{\circ} 24' 47,46''$  S e  $49^{\circ} 14' 52,56''$  O e altitude de 910 m. Os tratamentos consistiram na utilização de 22 cultivares de soja de hábito de crescimento determinado, cultivadas no período de 1940 à 2016, submetidas ao delineamento de blocos ao acaso, com cinco repetições. As cultivares foram selecionadas de diversos programas de melhoramento, levando em consideração a época de introdução ou registro no Brasil, rendimento e com maior representatividade em área de cultivo no Sul do Brasil (MIYASAKA; MEDINA, 1981; OCEPAR, 1982; OCEPAR, 1983; VERNETTI, 1983; BONATO; BONATO, 2002).

O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 2006) coletado em área cultivada com *Pinus taeda*, nos 20 cm superficiais. As características químicas foram de 0,4 ppm de fósforo (P), 9,8  $\text{g dm}^{-3}$ , pH  $\text{CaCl}_2$  4,3 e pH SMP 6,1; 1,39; 4,6; 0,25; 0,05; 0,03  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de alumínio (Al), H +Al, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), respectivamente com saturação por bases (V%) de 6,6 %. As características físicas em relação à granulométrica foram de 100, 63, 593 e 244  $\text{g kg}^{-1}$  de argila, silte, areia grossa e fina, respectivamente, e as características mineralógicas foram descritas por Alves et al. (2013). Após homogeneizado, o solo coletado foi peneirado em malha de 5 mm, para posterior correção da acidez com calcário filler, para elevação da V% para 70%. Depois de um mês de incubação com o calcário e uma semana antes da semeadura, foi realizada adubação com a mistura ao solo de 200; 50; 50; 10; 5; 3; 1; 1; 0,15; 0,1 e 0,1  $\text{mg dm}^{-3}$  de P, K, enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), boro

(B), cobre (Cu), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e cobalto (Co), respectivamente (Malavolta, 1980). Os vasos continham sete  $\text{dm}^{-3}$  de solo.

Tabela 1 – Cultivares de soja utilizadas no experimento com o ano de introdução ou registro no Brasil.

Cultivar	Ano de lançamento*	Cultivar	Ano de lançamento	Cultivar	Ano de lançamento
Amarela comum**	1940	CEP 12-Cambará	1984	CD 214 RR	2003
Bienville	1958	BR-16	1987	CD 219 RR	2003
Santa Rosa	1964	FT-Abyara	1989	BRS ativa RR	2008
Bragg	1966	FT-Saray	1993	TMG 1066 RR	2009
Flórida	1968	Fepagro RS-10	1995	CD 202 RR	2011
São Luiz	1973	CD 202	1998	CD 2590 IPRO	2012
Bossier	1973	CD 216	2003	CD 2694 IPRO	2012
BR-4	1979				

\* Para as cultivares introduzidas no Brasil de outros países, considerou-se o ano de introdução como sendo o ano de lançamento.

\*\* O ano de introdução foi anterior, mas considerou-se esse ano pelo início do cultivo comercial

As grãos foram inoculadas com estirpes *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079 e SEMIA 5080) na dose de 2 milhões de unidades formadoras de colônias  $\text{grão}^{-1}$ , realizando a semeadura na profundidade de 2 cm, na data de 10 de dezembro de 2015. No estágio fenológico V3 foi realizado o raleio (FEHR; CAVINESS, 1977), deixando duas plantas por vaso, juntamente com a re-inoculação na dose seis vezes superior à aplicada anteriormente (EMBRAPA, 2011) e adubação complementar de Ca e Mg na dose de 50 e 25  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente, aplicados na superfície do solo. Adubação de cobertura foi realizada no estágio V3 e R1 na dose de 50 e 41  $\text{mg dm}^{-3}$  de K e S em cada estágio fenológico, respectivamente, aplicados na superfície do solo (MALAVOLTA, 1980). Durante o desenvolvimento da cultura foram realizadas práticas agrônômicas para o máximo potencial produtivo.

As plantas foram colhidas no estágio fenológico R8 (maturidade fisiológica) (FEHR; CAVINESS, 1977), exceto as folhas, que foram coletadas conforme senesciam. A matéria seca da planta foi obtida separadamente em vagem, folha, haste, raiz e grãos, a partir da secagem separada à 60 °C até manutenção de matéria constante. A matéria seca das folhas considerou todas as coletadas

durante o ciclo, a medida que senesciam. Os parâmetros morfológicos e componentes de rendimento avaliados foram: área foliar planta<sup>-1</sup> (m<sup>2</sup>) estimada por meio de imagem de seis trifólios escolhidos aleatoriamente de cada vaso, a partir das quais se obteve a área através do software Image-J (ABRÀMOFF et al., 2004). Desses trifólios se determinou a matéria seca e com isso, estimou-se a área foliar em cada parcela; área foliar específica (m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) obtida pela relação entre a área foliar e a matéria seca total de folha planta<sup>-1</sup>; diâmetro da haste (mm) pela medida com auxílio do paquímetro aproximadamente um centímetro abaixo do nó cotiledonar; altura de planta (cm) pela medida com régua graduada da superfície do solo até a inserção da última vagem na haste principal; vagem planta<sup>-1</sup> contando-se manualmente aquelas com no mínimo uma grão totalmente desenvolvida; grão planta<sup>-1</sup> pela contagem manual de todas as grãos produzidas em cada vaso dividindo pelo número de plantas (duas); grão vagem<sup>-1</sup> obtida pela relação grão planta<sup>-1</sup> e vagem planta<sup>-1</sup>; nó reprodutivo, contando-se os nós que apresentavam no mínimo uma vagem; vagem nó reprodutivo<sup>-1</sup>, obtido pela relação entre vagem planta<sup>-1</sup> e nó reprodutivo planta<sup>-1</sup>; nó planta<sup>-1</sup> pela contagem manual de todos os nós (com e sem vagem); eficiência de nó reprodutivo (%) que foi obtido pela relação entre nó reprodutivo e nó planta<sup>-1</sup> ((nó reprodutivo planta<sup>-1</sup>/nó planta<sup>-1</sup>) X 100); ramo planta<sup>-1</sup> contando-se manualmente todos os ramos a partir da haste principal; rendimento de grão planta<sup>-1</sup> após obtenção da matéria seca das grãos, corrigiu-se para 13 % de umidade; tamanho da grão pela relação do rendimento de grão planta<sup>-1</sup> e quantidade de grão planta<sup>-1</sup>; índices de partição (IP) de vagem (IPV), folha (IPF), haste (IPH), raiz (IPR) e de grãos (IPG) calculados a partir da relação da matéria seca de cada parte da planta pela matéria seca total da planta. O índice de partição da matéria vegetativa (IPPV) foi obtido pela soma do IPF, IPH e IPR enquanto o índice de partição da parte reprodutiva (IPPR) pela soma do IPG e IPV. Para os cálculos do IP de cada parte da planta foi utilizada a seguinte fórmula:

$$IPw = (MSw/MSt) \times 100$$

Onde: IPw: índice de partição da parte da planta para a qual se está calculando o IP

MSw: matéria seca da parte da planta para a qual se está calculando o IP

MSt: matéria seca total da planta, obtida pela soma das matérias secas das grãos, vagens, folhas, hastes e raízes

Os dados foram submetidos a ANOVA e posteriormente ao teste de Tukey (p<0,05) para comparação das médias. Análises de regressão entre ano de lançamento e rendimento, componentes de rendimento e parâmetros morfológicos foram conduzidas com as médias dos tratamentos. Entre o rendimento planta<sup>-1</sup> e componentes de rendimento foi realizada correlação de Pearson.

As análises de trilha genotípica e fenotípica foram realizadas com todos os dados obtidos. O nível genotípico leva em consideração as características genéticas, excluindo o fator ambiental, e

o nível fenotípico leva em consideração os fatores genéticos e ambientais. Esses níveis foram analisados nas classes primária, secundária, terciária e quaternária, utilizando modelo adaptado do trabalho de Kahlon et al. (2011). Segundo este modelo, no primeiro nível o rendimento planta<sup>-1</sup> é influenciado pelo tamanho do grão e grão planta<sup>-1</sup>, no segundo nível a grão planta<sup>-1</sup> é influenciado por grão vagem<sup>-1</sup> e vagem planta<sup>-1</sup>, no terceiro nível a vagem planta<sup>-1</sup> é influenciado por vagem nó reprodutivo<sup>-1</sup> e nó reprodutivo planta<sup>-1</sup>, e no quarto nível o nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> é influenciado pela eficiência nó reprodutivo e nó planta<sup>-1</sup>. A análise de trilha dos níveis foi realizada com o programa GENES, conforme descrito por Cruz (2013).

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.5.1 Parâmetros morfológicos

As cultivares não diferiram ( $P>0,05$ ) quanto a inserção da primeira vagem, altura e ramo planta<sup>-1</sup> em relação ao ano de lançamento da cultivar ficando com média de 16,2 cm, 80,7 cm e 7,7, respectivamente. Porém, o diâmetro de haste diminuiu ao longo do período analisado (Figura 1a). Em três experimentos com diferentes grupos de maturação, Rogers et al. (2015) também não observaram variação na altura de planta para a maioria dos experimentos. Porém, alguns trabalhos relataram sua diminuição (JIN et al., 2010; RAMTEKE et al., 2011) e outros apresentam períodos de diminuição e acréscimo na altura (USTUN et al., 2001). Esses resultados contraditórios provavelmente expressam o foco dado aos programas de melhoramento de cada local e o período em que ocorreu (USTUN et al., 2001).

A área foliar específica não foi alterada, ficando em 0,3 m<sup>2</sup> g de folha<sup>-1</sup>, mas a área foliar planta<sup>-1</sup> diminuiu em aproximadamente 50 % (Figura 1b). Corroborando com os trabalhos de Morrison et al. (1999) e Jin et al. (2010) que demonstram que as cultivares modernas apresentam menor índice de área foliar. Entretanto, Pedersen e Lauer (2004b) encontraram índice de área foliar superior nas cultivares modernas em relação à antiga. Vários trabalhos demonstram que o melhoramento genético selecionou cultivares mais eficientes na transformação de energia luminosa em biomassa, por meio de incrementos na taxa fotossintética (EGLI, 1993; MORRISON et al., 1999; JIN et al., 2010; KOESTER et al., 2014; CUI et al., 2016), porte ereto (FELIPE et al., 2013; KOESTER et al., 2014), diminuição do período vegetativo, aumento do período reprodutivo e da condutância estomática (ROWNTREE et al., 2014) e manutenção da área foliar durante o período de enchimento de grãos, resultando em incremento no acúmulo de matéria seca e atraso da senescência (KUMUDINI et al., 2001; KUMUDINI et al., 2002; PEDERSEN; LAUER, 2004b). Além disso, a área foliar juntamente com a manutenção da altura e quantidade de ramos por planta

devem ter proporcionado melhor disposição das folhas na planta, e consequentemente maior interceptação da radiação.

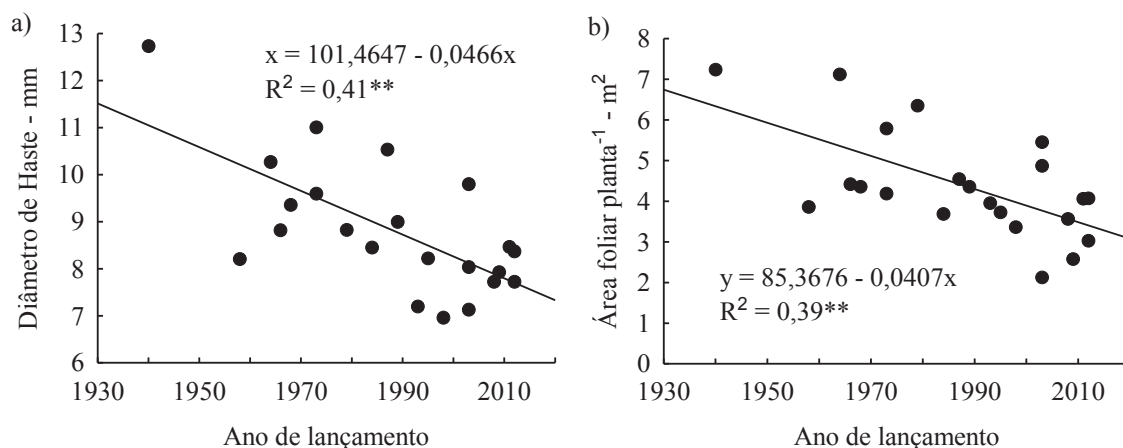


Figura 1. Relação entre o diâmetro de haste (a) e área foliar por planta (b) de cultivares de soja cultivadas de 1940 à 2016. \*\*: significativo em 5 % pelo valor-p.

O IP não foi alterado para folha e haste, ficando em 17 e 13,8 %, respectivamente. Porém, o somatório do incremento linear do IPV e IPG foi na mesma proporção em que diminuiu o IPR (Figura 2). Zhao et al., (2004) mostraram que as cultivares cultivadas apresentavam sistema radicular superficial com maior comprimento radicular e eficiência e alta resposta na absorção de fósforo em comparação com as cultivares selvagem. Porém, segundo Cui et al. (2016), o melhoramento genético selecionou cultivares com maior matéria seca na parte aérea e radicular, que se correlacionaram positivamente com a atividade radicular e massa da seiva radicular. Desse modo, para compensar a diminuição do sistema radicular observado ao longo dos anos (Figura 2.a), a seleção das cultivadas com maiores rendimentos de grãos deve ter proporcionado alterações em suas características, considerando especialmente alto suprimento de nutrientes e condições químicas adequadas da superfície do solo, assim, sem a necessidade de amplo sistema radicular e desenvolvimento em profundidade.

O IPG, também conhecido como índice de colheita, aumentou durante o período de análise (Figura 2c). O incremento do IPG leva em consideração a eficiência das plantas em acumular matéria seca na grão. Em Kumudini et al., (2001), o incremento da produtividade foi ocasionado em 22 e 78 % pelo índice de colheita e acúmulo de matéria seca total, respectivamente. Assim como o IPG, ocorreu acréscimo no IPPR e diminuição do IPPV (Figura 2d), e as cultivares passaram de 68 e 32 %, em 1940, para 55 e 45 %, em 2016, na relação da parte vegetativa e da parte reprodutiva, respectivamente. Estudos mostram que o acúmulo de matéria seca total é similar entre as cultivares antigas e modernas até o estágio fenológico R4 e/ou R5 (KUMUDINI et al., 2001; PEDERSEN; LAUER, 2004b). A partir desse período as cultivares modernas extrapolaram o acúmulo de matéria

seca total na cultivares antigas, por meio da senescência de folha, proporcionando menor índice de área foliar (PEDERSEN; LAUER, 2004b). e taxa fotossintética (KUMUDINI et al., 2001). Ademais, as cultivares antigas apresentavam, em sua maioria, ciclo de desenvolvimento tardio, que geralmente proporciona menor IPG (EDWARDS; PURCELL, 2005).

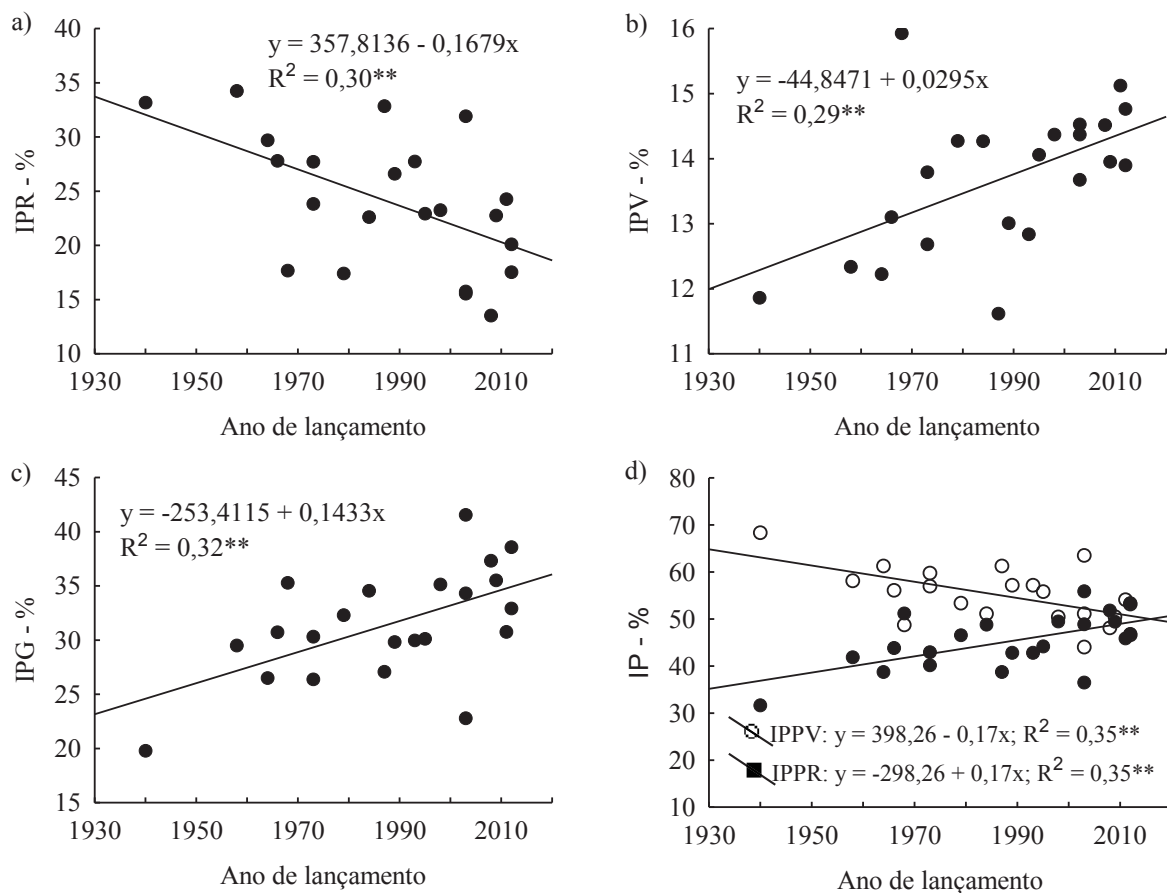


Figura 2. Variação do índice de partição de raiz - IPR (a), vagem - IPV (b), grão - IPG (c), parte vegetativa (IPPV), parte reprodutiva (IPPR) (d) de cultivares de soja cultivadas de 1940 à 2016. \*\*: significativo em 1 % pelo valor-p.

### 2.5.2 Componente de rendimento

O ano de lançamento das cultivares influenciou no rendimento de grãos com uma diminuição de  $12,5 \text{ g planta}^{-1}$  no período de análise (Figura 3a). Esta informação é contrária aos dados da literatura onde os ganhos de produtividade em áreas cultivadas chegam à  $71,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , dependendo do grupo de maturação, período, manejo e local de cultivo (USTUN et al., 2001; JIN et al., 2010; RAMTEKE et al., 2011; SUHRE et al., 2014; ROGERS et al., 2015). Apesar da diminuição do rendimento por planta, o número de grão  $\text{planta}^{-1}$  e tamanho de grão não tiveram alteração ao longo do período analisado, ficando com média de 181 e  $180 \text{ mg grão}^{-1}$ , respectivamente. Em outros trabalhos também não foram verificadas alterações no tamanho da grão como consequência do melhoramento genético e lançamento de novas cultivares, com resultados



médios variando de 110 a 170 mg grão<sup>-1</sup> (RAMTEKE et al., 2011; FELIPE et al., 2013; SUHRE et al., 2014).

A diminuição do rendimento planta<sup>-1</sup> demonstrado neste trabalho não reflete as condições de cultivo à campo, onde o melhoramento genético contribui entre ~50 % e ~67 % do aumento do rendimento das lavouras (FELIPE et al., 2013; SPECHT et al., 2014), sendo o restante influenciado pela alteração do manejo. Possivelmente a menor área foliar (Figura 1.b) e menor IPPV em contraste ao aumento do IPPR (Figura 2.d) tem permitido o aumento da população de plantas nos cultivos comerciais, ou que estaria refletindo neste aumento de produtividade. Alguns autores, diferentemente do trabalho atual, observaram que as cultivares modernas apresentam porte menor em comparação com as cultivares antigas (FELIPE et al., 2013; KOESTER et al., 2014; RINCKER et al., 2014), o que estaria contribuindo para o aumento da densidade populacional, e consequente aumento de produtividade (BALL et al., 2001).

O tamanho grão e grão planta<sup>-1</sup> não variaram com o ano de lançamento, mas tiveram uma tendência de diminuição, proporcionando efeito acumulativo e resultando em redução do rendimento planta<sup>-1</sup> (Figura 3a). Apesar da vagem planta<sup>-1</sup> (Figura 3c) diminuir com o ano de lançamento, a quantidade de grão planta<sup>-1</sup> (Figura 3b) se manteve devido ao aumento do número de grãos por vagem (Figura 3c). Contudo, a diminuição da quantidade de vagem planta<sup>-1</sup> foi na mesma proporção da redução da quantidade de nó e nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> (Figura 3e, 3f), assim, mantendo o número de vagem por nó reprodutivo em 1,7 e a eficiência de nó reprodutivo em 70 % (dado não publicado).

O tamanho do grão é incrementado pela maior taxa de acúmulo individual de matéria seca e maior duração do período de enchimento dos grãos, mas também devido ao menor número de grãos por planta (EGLI; ZHEN-WEN, 1991; EGLI, 1993). Como resultado ocorre ausência de ganho de rendimento. Acréscimos de rendimento de grãos por planta são obtidos com o aumento da quantidade de grãos por planta proporcionada pela maior produção de matéria seca total em R1 e R5 e maior taxa de acumulação de biomassa da planta, mesmo que ocorram menores taxas de acúmulo individual de biomassa por grão (EGLI; ZHEN-WEN, 1991; EGLI, 1993; BOARD; MODALI, 2005; JIN et al., 2010; SUHRE et al., 2014). Assim, o número de grãos por planta é uma das principais características para a seleção de cultivares para maiores produtividades.

O rendimento planta<sup>-1</sup> apresentou uma forte correlação de Pearson com número de grão planta<sup>-1</sup>, vagem planta<sup>-1</sup>, nó planta<sup>-1</sup> e nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> (Tabela 2). Apesar de não ter diferença na quantidade de grãos planta<sup>-1</sup> e tamanho de grão ao longo do período de avaliação, a forte correlação entre rendimento planta<sup>-1</sup> e grão planta<sup>-1</sup> demonstra que este é o principal fator que afeta o rendimento planta<sup>-1</sup>. A quantidade de grão planta<sup>-1</sup> foi fortemente relacionada com a vagem



planta<sup>-1</sup> (Tabela 2). Apesar do incremento de grão vagem<sup>-1</sup> com o ano de lançamento (Figura 3b), não se relacionou com rendimento planta<sup>-1</sup>. A vagem planta<sup>-1</sup> teve alta e positiva correlação com nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> (Tabela 2), mas tendência não encontrada com vagem nó reprodutivo<sup>-1</sup> (Tabela 2). O nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> foi mais controlado pelo nó planta<sup>-1</sup> do que pela eficiência de nó reprodutivo.

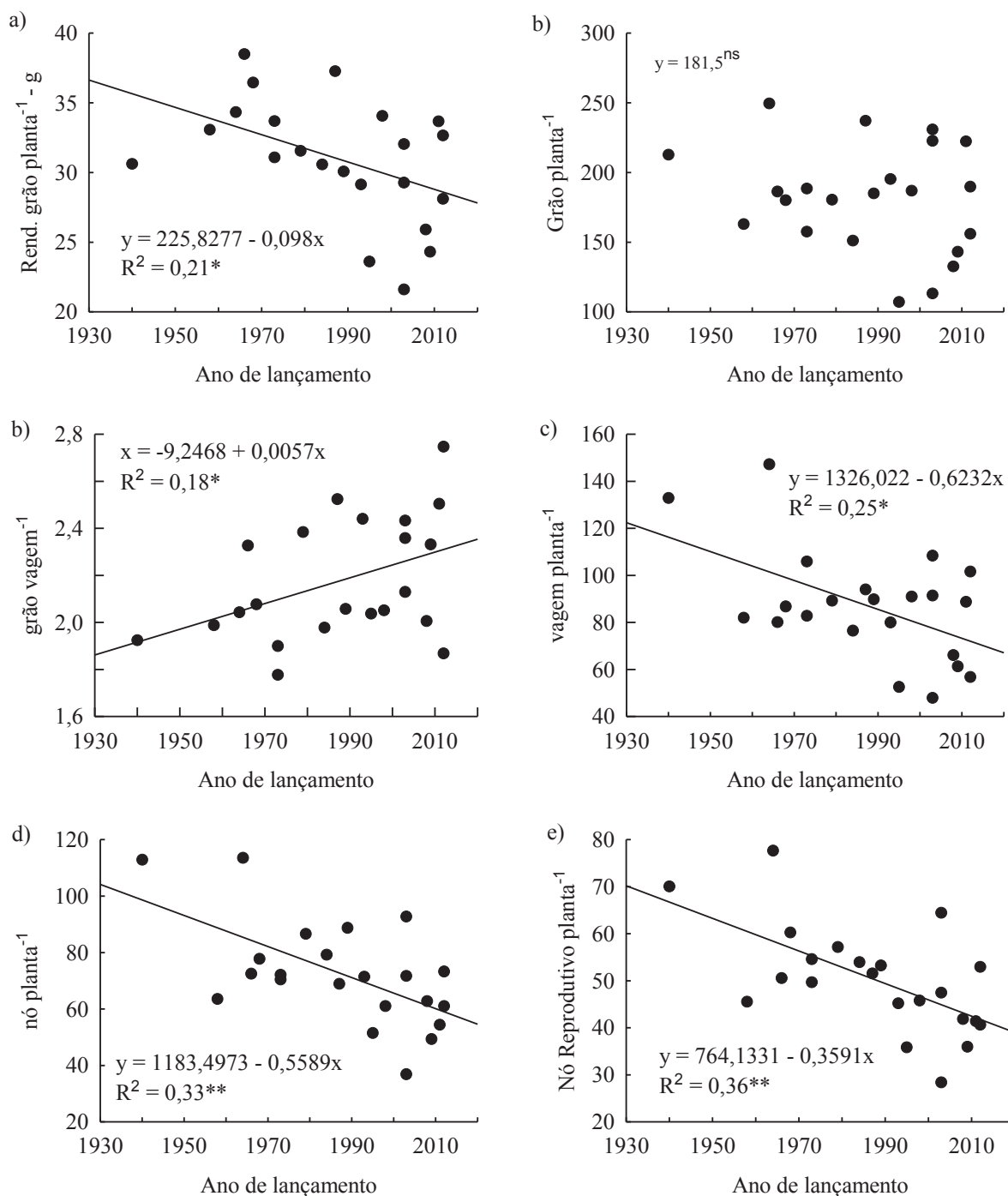


Figura 3. Variação do rendimento de grão planta<sup>-1</sup> (a), grão vagem<sup>-1</sup> (b), vagem planta<sup>-1</sup> (c), nó planta<sup>-1</sup> (d), nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> (e) de cultivares de soja cultivadas de 1940 à 2016. \*: significativo em 5 % e \*\* significativo em 1 %, pelo valor-p.

Tabela 2. Correlação linear de Pearson entre rendimento planta<sup>-1</sup> e os componentes de rendimento e entre os componentes de rendimento de cultivares de soja lançadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016.

Variável Independente	Variável Dependente	r	Valor P
No. semente planta <sup>-1</sup>	Rendimento planta <sup>-1</sup>	0,77	***
Tamanho semente	Rendimento planta <sup>-1</sup>	-0,29	ns
Semente vagem <sup>-1</sup>	Rendimento planta <sup>-1</sup>	-0,12	ns
Vagem planta <sup>-1</sup>	Rendimento planta <sup>-1</sup>	0,76	***
Vagem nó reprodutivo <sup>-1</sup>	Rendimento planta <sup>-1</sup>	0,25	ns
Nó planta <sup>-1</sup>	Rendimento planta <sup>-1</sup>	0,68	***
Nó reprodutivo planta <sup>-1</sup>	Rendimento planta <sup>-1</sup>	0,78	***
Eficiência nó reprodutivo	Rendimento planta <sup>-1</sup>	0,01	ns
Semente vagem <sup>-1</sup>	No. sementes planta <sup>-1</sup>	0,05	ns
Vagem planta <sup>-1</sup>	No. sementes planta <sup>-1</sup>	0,90	***
Vagem nó reprodutivo <sup>-1</sup>	Vagem planta <sup>-1</sup>	0,53	*
Nó reprodutivo planta <sup>-1</sup>	Vagem planta <sup>-1</sup>	0,89	***
Nó planta <sup>-1</sup>	Nó Reprodutivo	0,96	***
Eficiência nó reprodutivo	Nó Reprodutivo	-0,26	ns

\* Significativo no nível de 0,05; \*\* Significativo no nível de 0,01

\*\*\* Significativo no nível de 0,001

ns = Não significativo

### 2.5.3 Análise de trilha do rendimento e componente de rendimento

A análise de trilha permite avaliar o grau de influência genotípica, que corresponde aos fatores genéticos, e fenotípica, correspondente aos fatores genéticos e ambientais, no rendimento de grãos. Neste trabalho, os efeitos genotípico e fenotípico influenciaram de forma similar o rendimento de grãos da soja (Tabela 3 e 4). No primeiro nível, a quantidade de grão planta<sup>-1</sup> apresentou efeito direto superior no rendimento planta<sup>-1</sup> do que o tamanho de grão (1,91 x 1,44 no efeito genotípico e 1,23 x 0,78 no efeito fenotípico). Entretanto, os efeitos indiretos do tamanho de grão foram negativos e superiores ao ocasionado pela quantidade de grão planta<sup>-1</sup> no rendimento planta<sup>-1</sup> (-1,61 x -1,22 no nível genotípico e -0,87 x -0,55 no nível fenotípico). Portanto, o efeito indireto negativo anula, ou até supera, o efeito direto do tamanho de grão no rendimento planta<sup>-1</sup>, assim ocasionando diminuição do rendimento planta<sup>-1</sup>. Este efeito negativo superior impede qualquer efeito direto do tamanho de grão no rendimento de planta<sup>-1</sup>. No segundo nível o efeito genotípico e fenotípico direto da vagem planta<sup>-1</sup> no grão planta<sup>-1</sup> foi aproximadamente o dobro do grão vagem<sup>-1</sup> com grão planta<sup>-1</sup> (1,14 x 0,55 no nível genotípico e 1,11 x 0,59 no nível fenotípico). O efeito genotípico e fenotípico indireto foi negativo e próximo ao direto do grão vagem<sup>-1</sup> com grão planta<sup>-1</sup>, assim compensando o efeito positivo e direto, mas para vagem planta<sup>-1</sup> as correlações

indiretas foram pequenas, resultando em maior correlação (Tabela 3 e 4). Desse modo, o efeito indireto compensa o efeito direto do grão vagem<sup>-1</sup> com grão planta<sup>-1</sup>.

Tabela 3. Correlação fenotípica (r), coeficientes do efeito direto e indireto entre (a) primeiro nível e rendimento planta<sup>-1</sup>, (b) segundo nível e grão planta<sup>-1</sup>, (c) terceiro nível e vagem planta<sup>-1</sup>, (d) quarto nível e nó rep. planta<sup>-1</sup> de 22 cultivares cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016.

a. Primeiro nível	Correlação fenotípica com rendimento planta <sup>-1</sup>	Efeito fenotípico direto com o rendimento planta <sup>-1</sup>	Efeito fenotípico indireto no primeiro nível via:	
			Semente planta <sup>-1</sup>	Tamanho semente
Semente planta <sup>-1</sup>	0,68	1,23		-0,55
Tamanho semente	-0,09	0,78	-0,87	
Coeficiente de determinação R <sup>2</sup> = 0,77 Efeito residual = 0,23				
b. Segundo nível	Correlação fenotípica com semente planta <sup>-1</sup>	Efeito fenotípico direto com semente planta <sup>-1</sup>	Efeito fenotípico indireto no segundo nível via:	
			Semente vagem <sup>-1</sup>	Vagem planta <sup>-1</sup>
Semente vagem <sup>-1</sup>	0,05	0,59		-0,54
Vagem planta <sup>-1</sup>	0,82	1,11	-0,29	
Coeficiente de determinação R <sup>2</sup> = 0,94 Efeito residual = 0,06				
c. Terceiro nível	Correlação fenotípica com vagem planta <sup>-1</sup>	Efeito fenotípico direto com vagem planta <sup>-1</sup>	Efeito fenotípico indireto no terceiro nível via:	
			Vagem nó rep. <sup>-1</sup>	Nó rep. planta <sup>-1</sup>
Vagem nó rep. <sup>-1</sup>	0,56	0,46		0,11
Nó rep. planta <sup>-1</sup>	0,89	0,83	0,06	
Coeficiente de determinação R <sup>2</sup> = 0,99 Efeito residual = 0,01				
d. Quarto nível	Correlação fenotípica com nó rep. planta <sup>-1</sup>	Efeito fenotípico direto com nó rep. planta <sup>-1</sup>	Efeito fenotípico indireto no quarto nível via:	
			Nó planta <sup>-1</sup>	Eficiência nó rep.
Nó planta <sup>-1</sup>	0,96	1,15		-0,19
Eficiência nó rep.	-0,31	0,34	-0,64	
Coeficiente de determinação R <sup>2</sup> = 0,99 Efeito residual = 0,01				

No terceiro nível, o nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> com vagem planta<sup>-1</sup> apresentou efeito genotípico e fenotípico direto próximo à 1,7 superior à vagem planta<sup>-1</sup> (Tabela 3 e 4). Os efeitos indiretos foram pequenos da vagem nó reprodutivo<sup>-1</sup> e nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> com vagem planta<sup>-1</sup>, o que demonstra pouca compensação nesses componentes de rendimento. O efeito genotípico e fenotípico direto entre nó planta<sup>-1</sup> e nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> foram superior a três vezes que com a eficiência de nó reprodutivo e nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> (1,19 x 0,32 no nível genotípico e 1,15 x 0,34 no nível fenotípico). No quarto nível, em contrário, o efeito genotípico e fenotípico indireto da eficiência de nó reprodutivo no nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> através de nó planta<sup>-1</sup> (-0,80 e -0,64, respectivamente) foram acima de três vezes que nó planta<sup>-1</sup> no nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> por meio do de nó planta<sup>-1</sup> (-0,22 e -0,19, respectivamente). Portanto, o efeito compensatório ocasionou correlação negativa entre eficiência nó reprodutivo e nó reprodutivo planta<sup>-1</sup>.

Tabela 4. Correlação genotípica (r), coeficientes do efeito direto e indireto entre (a) primeiro nível e rendimento planta<sup>-1</sup>, (b) segundo nível e grão planta<sup>-1</sup>, (c) terceiro nível e vagem planta<sup>-1</sup>, (d) quarto nível e nó rep. planta<sup>-1</sup> de 22 cultivares cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016.

a. Primeiro nível	Correlação genotípica com rendimento planta <sup>-1</sup>	Efeito genotípico direto com o rendimento planta <sup>-1</sup>	Efeito genotípico indireto no primeiro nível via:	
			Semente planta <sup>-1</sup>	Tamanho semente
Semente planta <sup>-1</sup>	0,69	1,91		-1,22
Tamanho semente	-0,17	1,44	-1,61	
Coeficiente de determinação R <sup>2</sup> = 0,99 Efeito r				
b. Segundo nível	Correlação genotípica com semente planta <sup>-1</sup>	Efeito genotípico direto com semente planta <sup>-1</sup>	Efeito genotípico indireto no segundo nível via:	
			Semente vagem <sup>-1</sup>	Vagem planta <sup>-1</sup>
Semente vagem <sup>-1</sup>	-0,01	0,55		-0,56
Vagem planta <sup>-1</sup>	0,87	1,14	-0,27	
Coeficiente de determinação R <sup>2</sup> = 0,99 Efeito residual = 0,01				
c. Terceiro nível	Correlação genotípica com vagem planta <sup>-1</sup>	Efeito genotípico direto com vagem planta <sup>-1</sup>	Efeito genotípico indireto no terceiro nível via:	
			Vagem nó rep. <sup>-1</sup>	Nó rep. planta <sup>-1</sup>
Vagem nó rep. <sup>-1</sup>	0,60	0,47		0,13
Nó Rep. planta <sup>-1</sup>	0,88	0,81	0,07	
Coeficiente de determinação R <sup>2</sup> = 0,99 Efeito residual = 0,01				
d. Quarto nível	Correlação genotípica com nó rep. planta <sup>-1</sup>	Efeito genotípico direto com nó rep. planta <sup>-1</sup>	Efeito genotípico indireto no quarto nível via:	
			Nó planta <sup>-1</sup>	Eficiência nó rep.
Nó planta <sup>-1</sup>	0,97	1,19		-0,22
Eficiência nó rep.	-0,48	0,32	-0,80	
Coeficiente de determinação R <sup>2</sup> = 0,99 Efeito r				

Portanto, os fatores indiretos para selecionar cultivares com maior rendimento planta<sup>-1</sup> são: grão planta<sup>-1</sup>, vagem planta<sup>-1</sup>, nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> e nó planta<sup>-1</sup>. Resultados similares foram obtidos por Kahlon et al. (2011), que identificaram que essas características apresentaram forte e positiva correlação com a produtividade, exceto em relação anó planta<sup>-1</sup>, que não apresentou relevância para a produtividade. Esses autores abordam que nó reprodutivo é um importante preditor para o rendimento, por ser de obtenção mais fácil que a quantidade de vagem e grão.

## 2.6 CONCLUSÕES

1. Entre os parâmetros morfológicos estudados, somente a área foliar e diâmetro da haste foram modificados. Entretanto, a área foliar específica, inserção da primeira vagem, altura da planta e ramo por planta não tiveram alteração entre cultivares antigas e novas;
2. As cultivares novas estão sendo mais eficientes na acumulação de matéria seca na parte reprodutiva, principalmente para grão. Na parte vegetativa, somente a partição da raiz sofreu alteração sendo diminuída com o passar dos anos, resultando em acréscimos proporcionais para a parte reprodutiva;

3. Além do rendimento planta<sup>-1</sup>, os componentes de rendimento grão vagem<sup>-1</sup>, vagem planta<sup>-1</sup>, nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> e nó planta<sup>-1</sup> exibem alteração entre as cultivares antigas e novas;
4. As modificações no rendimento de grãos foram devido ao número de grão planta<sup>-1</sup>, vagem planta<sup>-1</sup>, nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> e nó planta<sup>-1</sup>.

## REFERÊNCIAS

- ABRÀMOFF, M. D.; MAGALHÃES, P. J.; RAM, S. J. Image Processing with ImageJ. **Biophotonics International**, v. 11, n. 7, p. 36–42, 2004.
- ALLIPRANDINI, E. A. Ganho genético em soja no estado do Paraná, via melhoramento, no período de 1985/86 a 1989/90. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 28, n. 4, p. 489–497, 1993.
- ALVES, J. M. F.; MELO, V. D. F.; REISSMAN CB, KASEKER, J. F. Reserva Mineral de potássio em Latossolo cultivado com Pinus taeda L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 1599–1610, 2013.
- BALL, R. A.; MCNEW, R. W.; VORIES, E. D.; KEISLING, T. C.; PURCELL, L. C. Path analyses of population density effects on short-season soybean yield. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 1, p. 187–195, 2001.
- BATAGLIA, O. C.; MASCARENHAS, H. A. A.; TEIXEIRA, J. P. F.; TISSELI F. °, O. Acúmulo de matéria seca e nutrientes, em soja cultivar Santa-Rosa. **Bragantia**, v. 35, n. 2, p. 237–247, 1976.
- BOARD, J. E.; MODALI, H. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. **Crop Science**, v. 45, n. 5, p. 1790–1799, 2005.
- BOERMA, H. R. Comparison of Past and Recently Developed Soybean Cultivars in Maturity Groups. **Crop Science**, v. 19, p. 611–613, 1979.
- BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. B. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1987.
- BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **Cultivares que fizeram a história da soja no Rio Grande do Sul**. 1<sup>st</sup> ed. Passo Fundo-RS: Embrapa Trigo; 2002.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Décimo Primeiro levantamento/agosto de 2016. v.3, n. 11, p. 171.
- CONNOR, D. J.; LOOMIS, R. S.; CASSMAN, K. G. Community concepts. In: **Crop ecology: productivity and management in agricultural systems**. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press, p. 44-70, 2011.
- CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271–276, 2013.

CUI, S. Y.; YU, D. Y. Estimates of relative contribution of biomass, harvest index and yield components to soybean yield improvements in China. **Plant Breeding**, v. 124, n. 5, p. 473–476, 2005.

CUI, X.; DONG, Y.; GI, P.; et al. Relationship between root vigour, photosynthesis and biomass in soybean cultivars during 87 years of genetic improvement in the northern China. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 81–86, 2016.

D'UTRA, G. **Soja**. Jornal do agricultor, v. 7, n. Rio de Janeiro, p. 185–188, 1882.

DE BRUIN, J. L.; PEDERSEN, P. Growth, yield, and yield component changes among old and new soybean cultivars. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 1, p. 124–130, 2009.

EDWARDS, J. T.; PURCELL, L. C. Soybean yield and biomass responses to increasing plant population among diverse maturity groups: I. Agronomic characteristics. **Crop Science**, v. 45, n. 5, p. 1770–1777, 2005.

EGLI, D.B.; GUFFY, R.D. ; LEGGETT, J. E. Partitioning of Assimilate Between Vegetative and Reproductive Growth in Soybean. **Agronomy Journal**, v. 77, n. 59, p. 917–922, 1985.

EGLI, D. B. Cultivar maturity and potential yield of soybean. **Field Crops Research**, v. 32, p. 147–158, 1993.

EGLI, D. B. Yield components-regulation by the seed.. In **Seed biology and the yield of grain crops**. CAB Int., New York; p. 70–112, 1998.

EGLI, D. B. Comparison of Corn and Soybean Yields in the United States : Historical Trends and Future Prospects. **Agronomy Journal** , p. 79–88, 2008.

EGLI, D. B.; ZHEN-WEN, Y. Crop Growth Rate and Seeds per Unit Area in Soybean. **Crop Science**, v. 31, p. 439, 1991.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2005**. Sistemas de Produção, p. 242, 2011.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of Soybean Development. **Special report**, v. 80, n. March, p. 11, 1977.

FELIPE, M.; GERDE, J. A.; ROTUNDO, J. L. Soybean Genetic Gain in Maturity Groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. **Crop Science** , v. 12, n. december, p. 11–12, 2013.

HAMMOND, L. C.; BLACK, C. A.; NORMAN, A. G. Nutrient uptake by soybeans on two Iowa soils. **Agricultural Experiment Station**, Iowa state. 1951; 384:463-512.

JIN, J.; LIU, X.; WANG, G.; et al. Agronomic and physiological contributions to the yield improvement of soybean cultivars released from 1950 to 2006 in Northeast China. **Field Crops Research**, v. 115, n. 1, p. 116–123, 2010.

- KAHLON, C. S.; BOARD, J. E. Contribution of Remobilized Total Dry Matter to Soybean Yield Contribution of Remobilized Total Dry Matter. **Journal of Crop Improvement**, v. 26, p. 641–654, 2012.
- KAHLON, C. S.; BOARD, J. E.; KANG, M. S. An Analysis of Yield Component Changes for New vs. Old Soybean Cultivars. **Agronomy Journal**, p. 13–22, 2011.
- KOESTER, R. P.; SKONECZKA, J. A.; CARY, T. R.; DIERS, B. W.; AINSWORTH, E. A. Historical gains in soybean (*Glycine max* Merr.) seed yield are driven by linear increases in light interception, energy conversion, and partitioning efficiencies. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 12, p. 3311–3321, 2014.
- KUMUDINI, S.; HUME, D. J.; CHU, G. Genetic improvement in short season soybeans: I. Dry matter accumulation, partitioning, and leaf area duration. **Crop Science**, v. 41, n. 2, p. 391–398, 2001.
- KUMUDINI, S.; HUME, D. J.; CHU, G. Genetic improvement in short season soybeans. **Crop Science**, v. 42, p. 141–145, 2002.
- LANGE, C. E.; FEDERIZZI, L. C. Estimation of soybean genetic progress in the South of Brazil using multi-environmental yield trials. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 3, p. 309–316, 2009.
- LI, Y.; ZHAO, S.; MA, J.; LI, D.; YAN, L.; LI, J.; QI, X.; GUO, X.; ZHANG, L.; HE, W.; CHANG, R.; LIANG, Q.; GUO, Y.; YE, C.; WANG, X.; TAO, Y.; GUAN, R.; WANG, J.; LIU, Y.; JIN, L.; ZHANG, X.; LIU, Z.; ZHANG, L.; CHEN, J.; WANG, K.; NIELSEN, R.; LI, R.; CHEN, P.; LI, W.; REIF, J. C.; PURUGGANAN, M.; WANG, J.; ZHANG, M.; WANG, J.; QIU, L. Molecular footprints of domestication and improvement in soybean revealed by whole genome re-sequencing. **BMC genomics**, v. 14, n. 1, p. 579, 2013.
- MALAVOLTA, E. A. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 251p, 1980.
- MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. **A soja no Brasil**. 1<sup>st</sup> ed. Campinas, SP, p. 1062, 1981.
- MORRISON, M. J.; VOLDENG, H. D.; COBER, E. R. Physiological Changes from 58 Years of Genetic Improvement of Short-Season Soybean Cultivars in Canada. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 4, p. 685, 1999.
- OCEPAR – Organização das Cooperativas do Estado do Paraná. **Resultados de pesquisa com soja nos anos de 1979/80 e 1980/81**. Cascavel, p. 109, 1982.
- OCEPAR – Organização das Cooperativas do Estado do Paraná. **Resultados de pesquisa com soja**. Cascavel, p. 60, 1983.
- PEDERSEN, P.; LAUER, J. G. Soybean growth and development in various management systems and planting dates. **Crop Science**, v. 44, n. 2, p. 508–515, 2004a.
- PEDERSEN, P.; LAUER, J. G. Response of soybean yield components to management system and planting date. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 5, p. 1372–1381, 2004b.



PERINI, L.; SILVA FONSECA, N. DA; DESTRO, D.; PRETE, C. E. C. Componentes da produção em cultivares de soja com crescimento determinado e indeterminado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. SUPPL.1, p. 2531–2544, 2012.

RAMTEKE, R.; GUPTA, G. K.; MURLIDHARAN, P.; SHARMA, S. K. Genetic progress of soybean varieties released during 1969 to 2008 in India Genetic progress of soybean varieties released during 1969 to 2008. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 71, n. 4, 333–340, 2011.

RINCKER, K.; NELSON, R.; SPECHT, J.; SLEPER, D.; CARY, T.; CIANZIO, S. R.; CASTEEL, S.; CONLEY, S.; CHEN, P.; DAVIS, V.; FOX, C.; GRAEF, G.; GODSEY, C.; HOLSHOUSER, D.; JIANG, G. L.; KANTARTZI, S. K.; KENWORTHY, W.; LEE, C.; MIAN, R.; MCHALE, L.; NAEVE, S.; ORF, J.; POYSA, V.; SCHAPAUGH, W.; SHANNON, G.; UNIATOWSKI, R.; WANG, D.; DIERS, B. Genetic Improvement of U.S. Soybean in Maturity Groups II, III, and IV. **Crop Science**, v. 54, n. 4, p. 1419–1432, 2014.

ROGERS, J.; CHEN, P.; SHI, A.; et al. Agronomic performance and genetic progress of selected historical soybean varieties in the southern USA. **Plant Breeding**, v. 134, n. 1, p. 85–93, 2015.

ROWNTREE, S. C.; SUHRE, J. J.; WEIDENBENNER, N. H.; et al. Genetic Gain  $\times$  Management Interactions in Soybean: I. Planting Date. **Crop Science**, v. 53, n. 3, p. 1128, 2013.

ROWNTREE, S. C.; SUHRE, J. J.; WEIDENBENNER, N. H.; et al. Physiological and phenological responses of historical soybean cultivar releases to earlier planting. **Crop Science**, v. 54, n. 2, p. 804–816, 2014.

SPECHT, J. E.; DIERS, B. W.; NELSON, R. L.; FRANCISCO, J.; TOLEDO, F.; TORRION, J. A.; GRASSINI, P.; Soybean. IN: SMITH, S.; DIERS, B.; SPECHT, J.; CARVER, B. (Ed.). **Yield gains in major U.S. field crops**. CSSA special publication 33. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 311–356, 2014.

SUHRE, J. J.; WEIDENBENNER, N. H.; ROWNTREE, S. C.; et al. Soybean yield partitioning changes revealed by genetic gain and seeding rate interactions. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 5, p. 1631–1642, 2014.

USTUN, A.; ALLEN, F. L.; ENGLISH, B. C. Genetic progress in soybean of the U.S. Midsouth. **Crop Science**, v. 41, n. 4, p. 993–998, 2001.

VERNETTI, F. J. **Soja, genética e melhoramento**. Fundação Cargill, 1983. 990 p.

WILCOX, J. R.; MERR, L. Sixty Years of Improvement in Publicly Developed Elite Soybean Lines. **Crop Science**, v. 49, p. 1711–1716, 2001.

WILSON, E. W.; ROWNTREE, S. C.; SUHRE, J. J.; et al. Genetic gain  $\times$  management interactions in soybean: II. nitrogen utilization. **Crop Science**, v. 54, n. 1, p. 340–348, 2014.

ZHAO, J.; FU, J.; LIAO, H.; et al. Characterization of root architecture in an applied core collection for phosphorus efficiency of soybean germplasm. **Chinese Science Bulletin**, v. 49, n. 15, p. 1611–1620, 2004.



### **3 MODIFICAÇÕES FISIOLÓGICAS E NUTRICIONAIS DE CULTIVARES DE SOJA CULTIVADAS NO SUL DO BRASIL**

#### **3.1 RESUMO**

O cultivo de soja no Brasil se iniciou em 1940 e desde então a cultura teve modificações relacionadas ao manejo e genótipos, mas não estão claras as alterações fisiológicas e nutricionais ocasionadas pelo melhoramento genético nas cultivares. Com isso, se objetivou determinar as alterações fisiológicas e nutricionais proporcionadas pelo melhoramento genético nas cultivares de soja cultivada no Sul do Brasil nos últimos 76 anos. Desse modo, foi realizado um experimento em casa de vegetação com 22 cultivares de soja lançadas no Sul do Brasil de 1940 a 2016. Foram cultivadas duas plantas por vaso de oito litros preenchido com solo. A escolha das cultivares se deu por meio da relevância na região Sul em relação ao ano de lançamento no país, produtividade e área cultivada. Foram determinadas características fisiológicas de clorofila, carotenoide e atividade enzimática da redutase do nitrato e urease e avaliada a concentração, extração, exportação, índice de partição, eficiência de absorção radicular e utilização de nutrientes e o rendimento de óleo e proteína no grão. A concentração de clorofila a e b e atividade enzimática da redutase do nitrato e urease não tiveram alteração ao longo do período analisado. Com o lançamento de novas cultivares o teor, conteúdo e partição de nutrientes nas diferentes partes da planta foram alterados. Os teores de óleo e de proteína correlacionaram-se negativamente e não foram modificados com o melhoramento genético. O foco do melhoramento na seleção de cultivares para altos rendimentos, em conjunto com as alterações no manejo, proporcionou modificações relevantes nas características da cultura.

Palavras chave: Evolução, proteína, óleo, nutriente, *Glycine max*.

### 3.2 ABSTRACT

Soybean cultivation in Brazil started in 1940 and since then a crop has had changes related to management and genotypes, but are not clear as physiological and nutritional changes caused by genetic improvement in cultivars. The aim of this study was to determine the physiological and nutritional changes provided by genetic improvement in soybean cultivated in southern Brazil in the last 76 years. Thus, a greenhouse experiment was carried out with 22 soybean cultivars launched in the South of Brazil from 1940 to 2016. Two plants were cultivated two plants per pot of eight liters filled with soil. The choice of cultivars was due to the relevance in the South region in relation to the year of introduction in the country, production and cultivated area. The physiological characteristics of chlorophyll, carotenoid and enzymatic activity of nitrate and urease reductase were evaluated and the concentration, extraction, export, partition index, root absorption efficiency and nutrient use and yield of oil and non - grain protein were evaluated. The chlorophyll concentration and the enzymatic activity of the nitrate and urease reductase did not change over the analyzed period. With the release of new cultivars and the content, content and partition of nutrients in different parts of the plant were changed. The oil and protein contents were negatively correlated and were not modified with the genetic improvement. The focus of the improvement in the selection of cultivars for high yields, together with how there is no management, provided relevant modifications in the characteristics of the crop.

Key words: Evolution, protein, oil, nutrient, *Glycine max*.

### 3.3 INTRODUÇÃO

Os cultivos comerciais de soja no Brasil iniciaram em 1940 com produtividade média de  $651 \text{ kg ha}^{-1}$  (BONATO; BONATO, 1987), e desde então a cultura apresentou diversas alterações no manejo (plantio direto, fungicida, herbicida, inseticida, adubação, espaçamento, densidade de plantio, entre outros) e cultivares (hábito de crescimento, ciclo de desenvolvimento e período juvenil). Desse modo, a produtividade média brasileira incrementou para  $2870 \text{ kg ha}^{-1}$  (CONAB, 2016), evidenciando ganhos de  $\sim 29 \text{ kg ha ano}^{-1}$ , onde o melhoramento genético representou até 67 % desse ganho (FELIPE et al., 2013; SPECHT et al., 2014).

O teor e conteúdo de nutrientes na planta podem ser alterados pelo ambiente de cultivo, manejo e genótipo, mas a influencia do melhoramento genético ao longo dos anos em relação aos nutrientes ainda possui escassas informações. Apenas alguns relatos mostram que a fertilidade do solo foi utilizada como estratégia para incrementos na acumulação de matéria seca e produtividade, consequentemente alterando a extração e eficiência dos nutrientes (BENDER et al., 2015). Assim como os parâmetros fisiológicos, onde alguns trabalhos que relatam que o melhoramento genético selecionou indiretamente cultivares com maior teor de clorofila e taxa fotossintética (MORRISON et al., 1999), devido ao foco na seleção de cultivares de alta produtividade, que apresentam maiores valores dessas características superiores em relação às cultivares de baixa produtividade (DA-YONG et al., 2012).

O grão de soja apresenta elevado teor de óleo ( $330$  e  $455 \text{ g kg}^{-1}$ ) e de proteína ( $157$  a  $242 \text{ g kg}^{-1}$ ) (JIN et al., 2010; HOUX et al., 2014; BRANCALIÃO et al., 2015; ROGERS et al., 2015), sendo fonte de proteína para alimentação humana e animal. Na literatura, há relatos que o melhoramento genético proporcionou acréscimos de  $0,16 \text{ g kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de óleo e redução de proteína em  $0,17 \text{ g kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , relacionando de forma negativa entre esses parâmetros (ROGERS et al., 2015), mas na maioria dos trabalhos, essas características não foram modificadas (JIN et al., 2010; HOUX et al., 2014; BRANCALIÃO et al., 2015). Além do genótipo, esses parâmetros apresentam influência do ambiente e manejo (HOUX et al., 2014). Além do teor de proteína, a análise da atividade de enzimas relacionadas ao ciclo do N na planta podem ser importantes para esclarecer os efeitos no teor de proteína. Enzimas chave no metabolismo do N são a redutase do nitrato, responsável pela redução do nitrato em nitrito (THIBODEAU; JAWORSKI, 1975; HATAM; HUME, 1976) e a urease que cataboliza a reação da quebra dos ureídeos em  $\text{CO}_2/\text{NH}_3$  (TODD; POLACCO, 2004).

Diante dessas dúvidas em relação ao melhoramento genético, foi realizado experimento com os seguintes objetivos (i) identificar se os parâmetros fisiológicos de clorofila a e b, carotenoide e atividade enzimática da redutase do nitrato e urease foram alterados nas cultivares de

soja cultivada nas últimas oito décadas no Sul do Brasil, (ii) verificar a evolução da exigência, partição e eficiência nutricional em cultivares de soja ao longo dos últimos 76 anos e (iii) conferir a qualidade do grão relacionada a teores de proteína e óleo de cultivares antigas e modernas de soja.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

Experimento na casa de vegetação foi conduzido no Setor de Ciências agrárias da Universidade Federal do Paraná (UFPR), nas coordenadas 25° 24' 47,46'' S e 49° 14' 52,56'' O e altitude de 910 m. O solo utilizado é oriundo dos 20 cm superiores de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 2006) apresentando as seguintes propriedades químicas: 0,4 ppm de fósforo (P), 9,8 g dm<sup>-3</sup>, pH CaCl<sub>2</sub> 4,3 e pH SMP 6,1; 1,39; 4,6; 0,25; 0,05; 0,03 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de alumínio (Al), H +Al, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), respectivamente, e saturação por bases (V%) 6,6 %. Utilizou o extrator Mehlich I para análise de P e K e KCl 1 mol L<sup>-1</sup> para Ca, Mg e Al. A granulometria consistiu de 100, 63, 593 e 244 g kg<sup>-1</sup> de argila, silte, areia grossa e fina, respectivamente, e as características mineralógicas foram descritas por Alves et al. (2013). Foi aplicado calcário filler, com 15, 27 e 100 % de MgO, CaO e PRNT de acordo, para elevar a V% , incubando um mês antes da semeadura da soja. Além disso, uma semana antes da semeadura, o solo foi homogeneizado com nutrientes na dose de 200; 50; 50; 10; 5; 3; 1; 1; 0,15; 0,1 e 0,1 mg dm<sup>-3</sup> solo, com P, K, enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), boro (B), cobre (Cu), molibdênio (Mo), níquel (Ni) (Malavolta, 1980) e cobalto (Co), respectivamente, utilizando reagentes PA.

A soja [*Glycine max.* (L.)] foi semeada em vasos com sete dm<sup>-3</sup> de solo, consistindo os tratamentos de 22 cultivares cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016 (Tabela 1), submetidas ao delineamento de blocos ao acaso, com cinco repetições. As cultivares foram selecionadas de diversos programas de melhoramento, levando em consideração a época de introdução ou registro nacional de cultivares no Brasil, produtividade e representatividade em área e período de cultivo no Sul do Brasil (MIYASAKA; MEDINA, 1981; OCEPAR, 1982; OCEPAR, 1983; VERNETTI, 1983; BONATO; BONATO, 2002). As sementes foram obtidas por meio do Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da Embrapa Soja, Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (Coodetec) e Tropical Melhoramento & Genética (TMG).

Tabela 5 – Cultivares de soja utilizadas no experimento com o ano de introdução ou registro no Brasil.

Cultivar	Ano de lançamento*	Cultivar	Ano de lançamento	Cultivar	Ano de lançamento
Amarela comum**	1940	CEP 12-Cambará	1984	CD 214 RR	2003
Bienville	1958	BR-16	1987	CD 219 RR	2003
Santa Rosa	1964	FT-Abyara	1989	BRS ativa RR	2008
Bragg	1966	FT-Saray	1993	TMG 1066 RR	2009
Flórida	1968	Fepagro RS-10	1995	CD 202 RR	2011
São Luiz	1973	CD 202	1998	CD 2590 IPRO	2012
Bossier	1973	CD 216	2003	CD 2694 IPRO	2012
BR-4	1979				

\* Para as cultivares introduzidas no Brasil de outros países, considerou-se o ano de introdução como sendo o ano de lançamento.

\*\* Ano de introdução foi em 1923, mas considerou 1940 por ser o primeiro registro de cultivo comercial de soja no Brasil.

As sementes foram inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079 e SEMIA 5080) na dose de 2 milhões de unidades formadoras de colônias semente<sup>-1</sup>, realizando a semeadura na profundidade de 2 cm, na data de 10 de dezembro de 2015. A determinação do estágio fisiológico da cultura foi conforme Fehr e Caviness (1977). No estágio fenológico V3 realizou o raleio, deixando duas plantas por vaso, juntamente com a re-inoculação na dose seis vezes superior à aplicada anteriormente na base da planta (EMBRAPA, 2011) e adubação complementar de Ca e Mg na dose de 50 e 25 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, aplicados na superfície do solo. Adubação de cobertura foi realizada no estágio V3 e R1 na dose de 50 e 41 mg dm<sup>-3</sup> de K e S, respectivamente, aplicados na superfície do solo em cada estágio fenológico (MALAVOLTA, 1980). Durante o desenvolvimento da cultura realizou-se práticas agrônômicas para o máximo potencial produtivo.

No estágio R1, foram coletados dois folíolos do segundo trifólio totalmente desenvolvido, a partir do ápice para avaliação da atividade da enzima redutase do nitrato, em duplicata, segundo metodologia adaptada de Hewitt e Smith (1975) e Mulder et al. (1959). Optou-se pelo segundo trifólio totalmente desenvolvido a partir do ápice pela atividade enzimática ser intermediária entre as folhas velhas e novas (Figura 4), identificada em teste preliminar. As folhas foram coletadas às 10h00min AM, em dias ensolarados, assim padronizando as condições para coleta do material

vegetal, levando diretamente para determinação no laboratório. O material vegetal fresco foi picado, evitando a nervura principal e secundária, e cerca de 200 mg foram colocados em tubos de ensaio enrolados com papel alumínio, com 4 mL de  $\text{KNO}_3$   $0,25 \text{ mol L}^{-1}$  em tampão fosfato de pH 7,4; permanecendo em banho maria por 2 horas. Posteriormente, pipetou-se 1 ml da solução da amostra no balão volumétrico de 50 ml, juntamente com 25 ml de  $\text{H}_2\text{O}$  e 1 ml de ácido sulfanílico, deixando em repouso por 10 minutos, adicionando-se em seguida 1 ml de alfa naftalamina e misturado. Na sequência foi acrescentado 1 ml de tampão de acetato de sódio 2 mol e completado o volume com água deionizada. Após 10 minutos foi realizada a leitura no colorímetro, determinando-se o teor de  $\text{N-NO}_2^-$  pela curva padrão.



Figura 4. Atividade da redutase do nitrato do 4° (balão 1 e 2), 3° (balão 3 e 4), 2° (balão 5 e 6) e 1° (balão 7 e 8) trifólio totalmente expandido a partir do ápice e o branco (balão 9 e 10).

A determinação da clorofila foi realizada no estágio R2, no primeiro trifólio totalmente desenvolvido, a partir do ápice, por meio do método de extração de Arnon (1949) e os comprimentos de onda e equações propostos por Lichtenthaler e Buschmann (2001). As nervuras principais e secundárias foram retiradas dos folíolos coletados, e 200 mg de material fresco foi macerado com 20 ml de acetona 80 % gelada. Em seguida procedeu-se a filtragem com papel filtro quantitativo faixa azul em funil, corrigindo o volume para 20 ml. Em seguida, realizou-se a leitura da absorbância (A) nos comprimentos de onda de 663,2; 646,8 e 470, determinando os teores de clorofila a ( $c_a$ ), clorofila b ( $c_b$ ) e carotenoide ( $c_{(x+c)}$ ) pelas seguintes equações:

$$c_a(\mu\text{g/ml}) = 12,25 A_{663,2} - 2,79 A_{646,8}$$

$$c_b(\mu\text{g/ml}) = 21,50 A_{646,8} - 5,10 A_{663,2}$$

$$c_{(x+c)}(\mu\text{g/ml}) = \frac{(1000 A_{470} - 1,91 c_a - 95,15 c_b)}{225}$$

Onde, as leituras de absorvância (A) são representada por  $A_{663,2}$ ,  $A_{646,8}$  e  $A_{470}$ , com o respectivo comprimento de onda avaliado. Prosseguindo com a correção da matéria fresca macerada e do volume utilizado.

O restante do segundo trifólio do ápice em direção a base totalmente expandida foi coletado no estádio R5 às 10h00min AM, em dias ensolarados, para determinação da atividade da enzima urease de modo indireto e em duplicata, por meio da metodologia adaptada a partir dos métodos descritos por McCullough (1967) e Hogan et al. (1983). Após a coleta, o material vegetal foi imediatamente levado ao laboratório para serem cortados, evitando as nervuras principais e secundárias, colocando-se 100 mg do material vegetal em tubo de ensaio de 15 ml, enrolado com papel alumínio, juntamente com 8 ml de tampão de  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  com uréia em pH 7,4, incubando por 3 horas na temperatura de 30 °C. Na alíquota de 0,5 mL do extrato foi adicionado 2,5 mL do reagente I (Fenol 0,1 mol L<sup>-1</sup> + Nitroprussiato de sódio 170 µmol L<sup>-1</sup>) e 2,5 do reagente II (NaOH 0,125 mol L<sup>-1</sup> +  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  0,15 mol L<sup>-1</sup> + NaOCl - 3%  $\text{Cl}_2$ ), tampando os tubos para evitar a perda de  $\text{NH}_3$ . Prosseguindo, levou-se os tubos de ensaio ao em banho maria a 37 °C por 35 minutos. Posteriormente, fez-se a leitura no espectrofotômetro no comprimento de onde de 625 nm, determinando-se a concentração pela a curva padrão.

As plantas foram colhidas na maturidade fisiológica (R8), exceto as folhas, que foram coletas conforme senesciam. As plantas foram divididas em folha, haste, vagem e grão. Considerou-se vagem as que continham no mínimo uma semente totalmente desenvolvida. A matéria seca de cada parte da planta foi determinada a partir da secagem à 60 °C até manutenção de matéria constante. Os macro (P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Zn, Mn, Fe, Cu e B) do material vegetal foram extraídos por digestão ácida com 6 ml de  $\text{HNO}_3$  (1:1) e 2 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (130 volumes) em micro-ondas, conforme metodologia adaptada de Silva (2009), com determinação destes nutrientes por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). A análise de carbono (C) e nitrogênio (N) foi realizada por meio de combustão seca em analisador elementar (modelo Vario EL III®), com três repetições.

Os teores de nutrientes foram utilizados na determinação da extração (ET) de nutrientes pela planta e exportação (EP) de nutrientes pelos grãos. Além disso, determinou o índice de partição (IP), eficiência absorção radicular (EAR) e eficiência utilização (EU) de nutriente (GERLOFF; GABELMAN, 1983), por meio das seguintes equações.

$$\text{IP} = (\text{Conteúdo nutriente na parte da planta} / \text{ET}) \times 100$$

$$\text{EAR} = \text{ET} / \text{Matéria seca de raízes (g)}$$

$$\text{EU} = \text{Matéria seca grão (g)} / \text{ET}$$



Os teores de óleo e proteína foram determinados pelo equipamento de espectroscopia de infravermelho próximo (FT-NIR). Para cada amostra, foram coletados 32 scans, com resolução de  $4\text{cm}^{-1}$ ). Os espectros médios foram submetidos à predição em três modelos matemáticos distintos para cada constituinte.

Os dados obtidos foram submetidos a ANOVA e posteriormente ao teste de Tukey para comparação das médias. As médias de cada característica avaliada foram em relação ao ano de lançamento da cultivar observando as alterações nas características nutricionais e fisiológicas com o tempo.

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aumento da produtividade da soja no Brasil se deve a uma somatória entre melhoramento genético e manejo das lavouras. Novas variedades podem ter aumentado a produtividade não por alterar substancialmente sua fisiologia e atividade metabólica, mas sua morfologia, adaptada as técnicas mais atuais de manejo, incluindo maior população de plantas, eficiência na competição com as plantas vizinhas e maior fertilidade do solo. Esses ajustes podem ter alterado a quantidade extraída e a partição dos nutrientes entre os órgãos da planta.

O lançamento das cultivares ao longo dos anos não alterou os teores de clorofila a, clorofila b e carotenoide, permanecendo em média em 1,01; 0,75 e  $498,2\text{ mg g}^{-1}$ , respectivamente. Resultados obtiveram acréscimos no teor de clorofila (MORRISON et al., 1999; DA-YONG et al., 2012). Além disso, há relatos que o melhoramento genético, proporcionou indiretamente a seleção de cultivares com maior taxa fotossintética (MORRISON et al., 1999; JIN et al., 2010; DA-YONG et al., 2012), condutância estomática (MORRISON et al., 1999) e menor índice de área foliar (MORRISON et al., 1999; JIN et al., 2010).

A atividade das enzimas redutase do nitrato e urease que apresentaram média de  $8,0\text{ }\mu\text{mol NO}_2^{-2}\text{ g}^{-1}\text{ hora}^{-1}$  e  $205,5\text{ }\mu\text{mol NH}_4^{+}\text{ g}^{-1}\text{ hora}^{-1}$ , respectivamente, também não foram modificados ao longo dos anos. A concentração de nitrato e de uréia na planta influenciam a atividade destas enzimas, respectivamente (HATAM; HUME, 1976). Porém, a soja é atendida principalmente pelo  $\text{N-NH}_3$  proveniente da fixação biológica (COOPER; SCHERER, 2012), o que pode justificar a não alteração da atividade das enzimas citadas.

No entanto, a concentração dos macronutrientes foi alterada na folha e na vagem, aumentando os valores de P e K e diminuindo de Mg e S (Figura 2) enquanto os micronutrientes Mn e Cu foram alterados em todas as partes da planta, os de Zn na haste e grãos e os de Fe apenas na haste, sendo que somente o Cu aumentou os valores enquanto os demais diminuíram com as variedades mais recentes (Figura 3). Considerando os grãos que são destinados para a alimentação



humana e animal, o Cu incrementou em 26 % e o Zn e Mn diminuíram em 18 % ao longo do período avaliado. Na parte vegetativa, a concentração de C, S e Cu foram superiores na haste do que na folha, mas para o restante dos nutrientes, a folha teve teor superior. Na parte reprodutiva, a vagem teve concentração superior de C, K, Ca, Mg, Mn e B, enquanto no grão o teor de P, Zn, Fe e Cu foram superior.

O melhoramento genético intensificou a seleção de cultivares mais adaptadas às condições de cultivo de cada época, escolhendo indiretamente cultivares com maior concentração de K e P na folha. Essa alteração pode ter proporcionado maiores benefícios quanto a tolerância a estresses bióticos (AMTMANN et al., 2008) e abióticos (CAKMAK, 2005) pelo aumento do K e incrementos na condutância estomática (MORRISON et al., 1999) e taxa fotossintética (MORRISON et al., 1999; JIN et al., 2010; DA-YONG et al., 2012) pelo aumento do P nas cultivares modernas, assim, melhorando a tolerância a estresse hídrico (WARAICH et al., 2011).

O incremento na concentração de Cu em todas as partes, pode ter aumentado a eficiência metabólica das plantas uma vez que este nutriente está envolvido na respiração, fotossíntese e proteção ao estresse oxidativo (BROADLEY et al., 2011). O melhoramento genético focado para o incremento de produtividade resultou em diminuição da qualidade do grão quanto ao teor de Zn, um importante nutriente para a nutrição humana (WELCH, 2008) e animal. Havendo a necessidade dos programas de melhoramento genético focarem na seleção de variedades com superior concentração deste nutriente nos grãos, para reduzir a deficiência especialmente em humanos.

A extração por planta diminuiu para todos os nutrientes avaliados, com exceção do Cu ( $y = 0,29 \text{ mg planta}^{-1}$ ; Figura 9.d) e a exportação de nutriente por planta reduziu para C (21 %), N (26 %), P (18 %), K (21 %), S (25 %), Zn (33 %) e Mn (34 %), e se manteve para Ca, Mg, Fe, Cu, B (Figura 8, Figura 9). Maior produção de matéria seca de grãos e total nas cultivares modernas, propiciando incrementos na extração e exportação de nutrientes, com exceção de Mg, Fe e B, ocasionada pelo incremento no índice de colheita (BENDER et al., 2015) e manutenção das folhas durante o período de enchimento de grão (KUMUDINI et al., 2001; PEDERSEN; LAUER, 2004).



Figura 5. Cultivar Amarela Comum com as folhas senescendo durante o período de enchimento de grão.

O IP apresentaram alteração na folha, para C, Ca e Mg, na haste, para S, Zn, Mn, Fe e B, e na vagem, para o S e Cu (Figura 10, Figura 11). Os nutrientes com IP nos grãos maior que 40%, ou seja, mais depositados nos grãos que em todo restante da parte aérea da planta, foram o N, P, K, S, Zn e Cu, concordando com outros trabalhos (BENDER et al., 2015). O IP de nutrientes no grão, ou índice de colheita, incrementou para Ca (de 13,9 para 22,5 %), Mg (de 27,3 para 42,6 %), Mn (de 22,3 para 35,4 %), B (de 33,0 para 43,2 %), S (de 56,05 para 69,5), C (de 40,5 para 48,5 %) e Zn (de 59,6 para 70,1 %) (Figura 10 e 7). O índice de colheita para o N (81,9%), P (89,2 %), K (67,8 %) e Cu (79,1 %), permaneceram constantes. Desse modo, apesar do decréscimo da extração de nutrientes por planta, a diminuição da concentração no grão de alguns nutrientes foi compensada pelo acréscimo na eficiência de translocação para o grão. Bataglia et al. (1976), trabalhando com a cultivar Santa Rosa, obteve IP no grão similares de P (83,7 %), Ca (16 %) e Mg (21,9 %), da mesma forma que Bender et al. (2015) que observaram o índice de colheita para N, P, S e Cu superiores a 60 %. No entanto, no trabalho de Borst e Thatcher (1931), houve incremento no índice de colheita para o P e redução do K nas novas cultivares. A sua alta concentração no grão se deve pela sua absorção, que ocorre principalmente a partir do período de enchimento de grão (46 %), e remobilização da folha (65 %) e haste (32 %) (BENDER et al., 2015). Porém, Fageria et al., (2008), na cultura do arroz, obteve acréscimos de produtividade com o incremento do índice de colheita do nitrogênio.

A EAR dos nutrientes foram incrementadas para N (150%), P (201%), K (208 %), Ca (105 %), Mg (83 %), S (104 %), Zn (75 %), Fe (101 %), Cu (347 %) e B (65 %), com exceção do Mn

que se manteve constante em  $876,3 \mu\text{g g}^{-1}$  (Figura 12, Figura 13). Esses expressivos acréscimos na EAR são proporcionados pela seleção indireta de cultivares com menor desenvolvimento radicular e maior eficiência na absorção, ocasionadas pelo incremento da fertilidade do solo ao longo dos anos, principalmente na camada de 0 – 20 cm (NICOLODI et al., 2009), assim não havendo a necessidade de abundante desenvolvimento radicular para absorção de nutrientes. Os maiores incrementos na EAR ocorreram para P e K, que eram os nutrientes mais limitantes para o desenvolvimento das cultivares antigas (NICOLODI et al., 2009), e o Cu, como citado anteriormente, pelo envolvimento na respiração, fotossíntese e proteção ao estresse oxidativo (BROADLEY et al., 2011).

No caso do P, a arquitetura das raízes possui alta relação com a absorção de P. As cultivares antigas apresentam sistema radicular profundo e menor comprimento e eficiência na absorção do nutriente, e conforme a seleção de cultivares adaptadas às condições de alta fertilidade na superfície do solo (adesão do plantio direto, adubação e deposição superficial, sem revolvimento do solo), as raízes das plantas selecionadas são mais rasas, compridas e de melhor distribuição tridimensional (ZHAO et al., 2004). Em raízes com o mesmo comprimento, as rasas apresentam menor sobreposição, eficiência na absorção de fósforo (GE et al., 2000) e competição entre raízes da mesma planta e de plantas diferentes em comparação com as raízes profundas (RUBIO et al., 2001). Deve-se considerar que a presença de raízes nas camadas superficiais do solo em áreas agrícolas coincide com o maior teor deste nutriente, especialmente no cultivo em plantio direto (NICOLODI et al., 2009). Entretanto, as raízes rasas proporcionam desvantagem em condições de estresse hídrico, por ocupar principalmente a superfície do solo, assim tendo menor disponibilidade de água para absorção. O aumento da EAR do nitrogênio provavelmente está relacionado ao uso de estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* mais adaptadas às diversas condições ambientais e de superior eficiência na fixação biológica de nitrogênio e afinidade com as cultivares.

A EU dos nutrientes foi incrementada para a maior parte dos nutrientes avaliados (C, N, Ca, Mg, Zn, Mn e Fe) e teve decréscimo somente para o Cu. Para os nutrientes P, K, S e B a EU se manteve em 165; 22,5; 238  $\text{g g}^{-1}$ ; 12,9  $\text{g mg}^{-1}$ , respectivamente (Figuras 11 e 12). As variedades estão sendo mais eficientes na alocação do carbono para o grão, ocasionadas pelo incremento no índice de colheita de matéria seca. A relação C/N apresentou alteração somente para a vagem (redução em 17%), para a folha, haste e grão se mantiveram em 30,5; 74,4 e 8,6; respectivamente (Figura 16). Na literatura, a EU de nutrientes em função do melhoramento genético são escassos, sendo em sua maioria relacionados a genótipos em função à adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. Onde, os genótipos apresentam respostas diferentes às doses aplicadas, ocasionando na divisão em eficientes e ineficientes na utilização do nutriente (FAGERIA et al., 2008).

Os teores de óleo e proteína não foram alterados ao longo do período analisado, permanecendo em 215 e 379 g kg<sup>-1</sup>; respectivamente. Porém, esses componentes se correlacionam negativamente ( $r = -0,81$ ;  $p < 0,001$ ; dado não apresentado), sendo influenciados por fatores genéticos e ambientais (PIPER; BOOTE, 1999). Rogers et al. (2015) trabalhando com cultivares lançadas ao longo de 80 anos no Sul dos Estados Unidos, observou que o óleo teve incremento de 0,16 g kg<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e a proteína redução em 0,17 g kg<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, apresentando correlação negativa entre esses dois compostos. Porém, em alguns trabalhos não se observou essa tendência no teor de óleo e proteína nos grãos (JIN et al., 2010; HOUX et al., 2014; BRANCALIÃO et al., 2015), por ter influência do ambiente, manejo e genótipo. A ausência de alteração na concentração de N no grão (Figura 3b) e no IP do N para os grãos (Figura 7b) reforça esta estabilidade no teor de proteína.

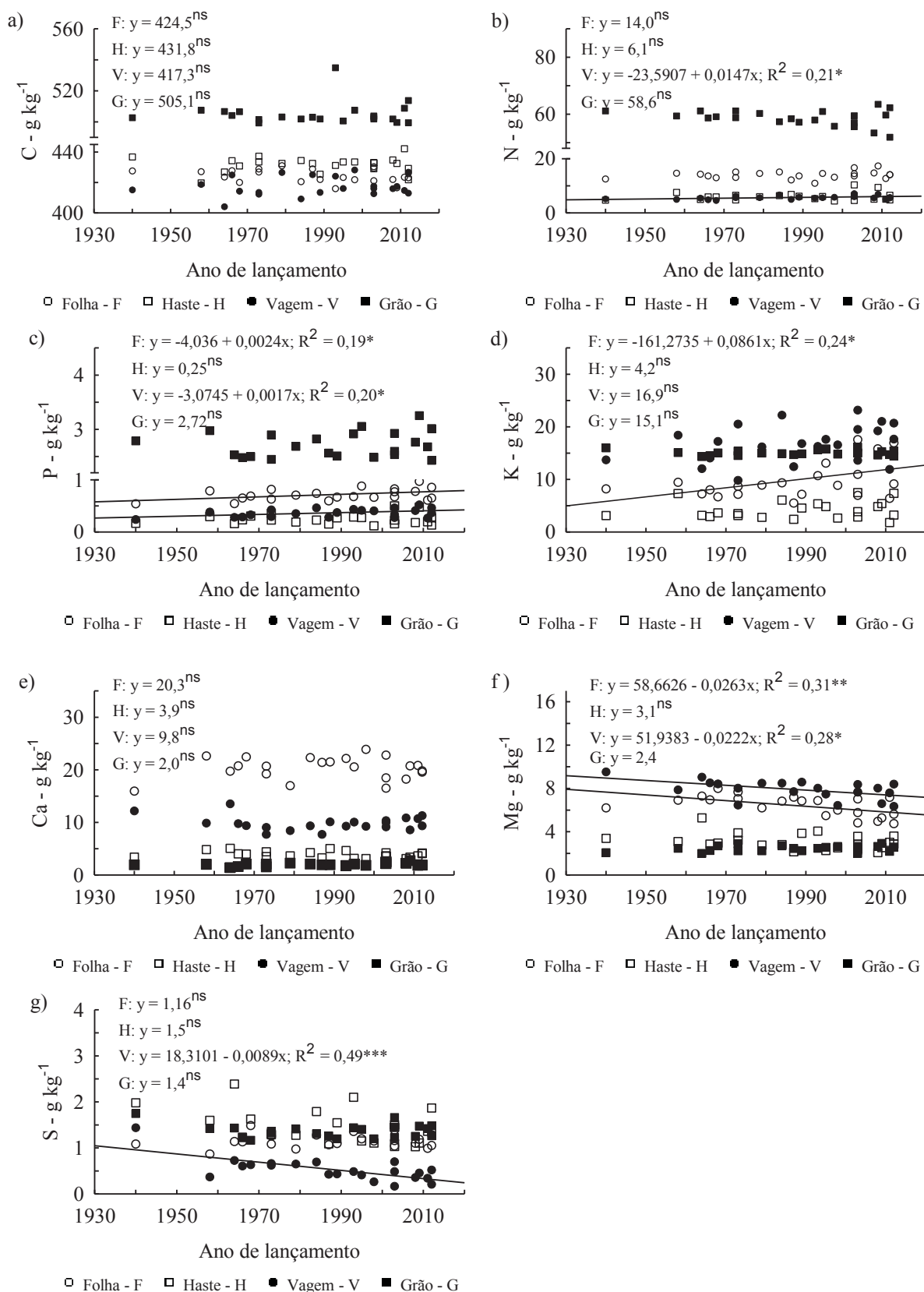


Figura 6. Concentração dos macronutrientes carbono (a), nitrogênio (b), fósforo (c), potássio (d), cálcio (e), magnésio (f) e enxofre (g) na folha (F), haste (H), vagem (V) e grão (G) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

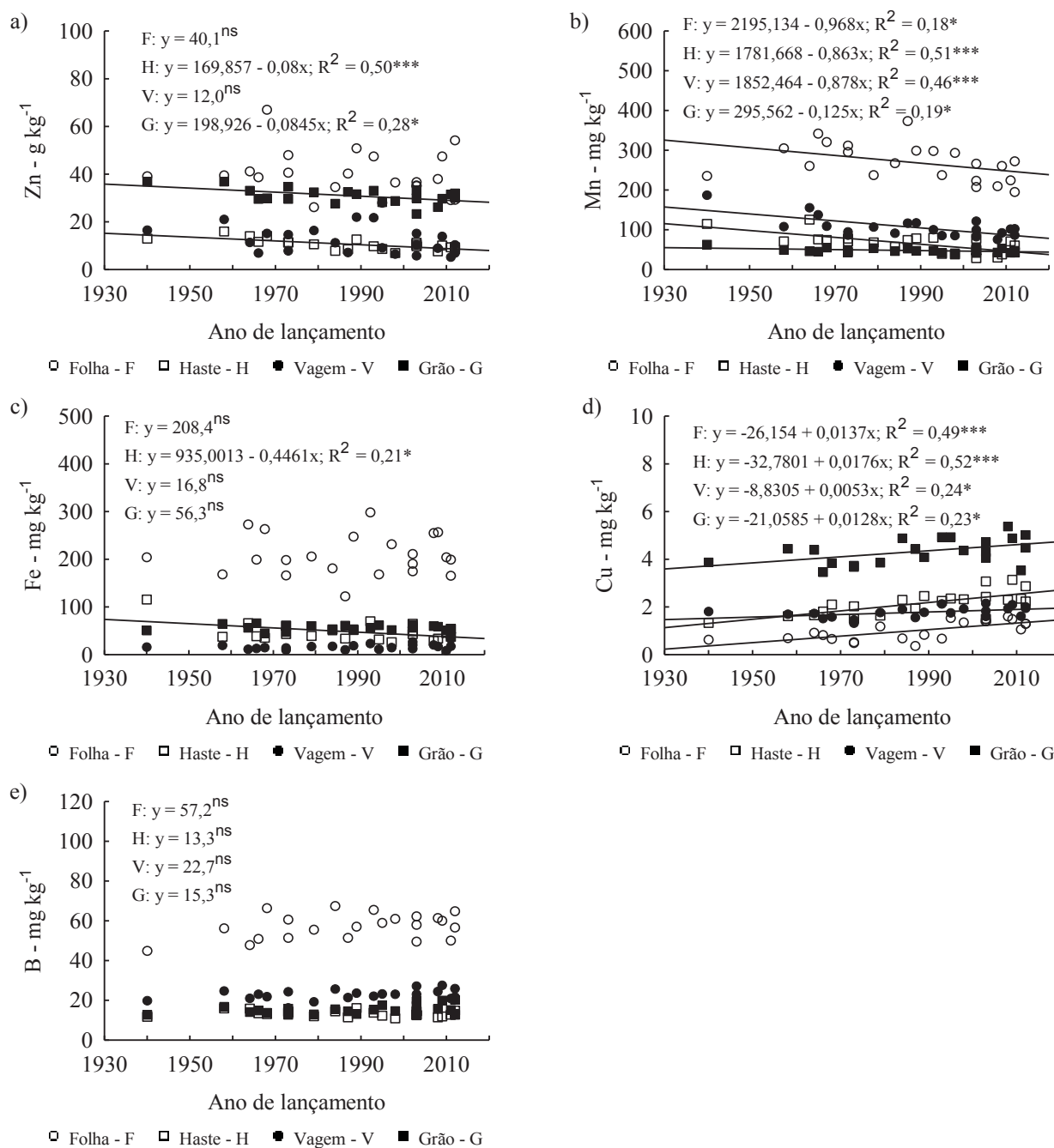


Figura 7. Concentração dos micronutrientes zinco (a), manganês (b), ferro (c), cobre (d) e boro (e) na folha (F), haste (H), vagem (V) e grão (G) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

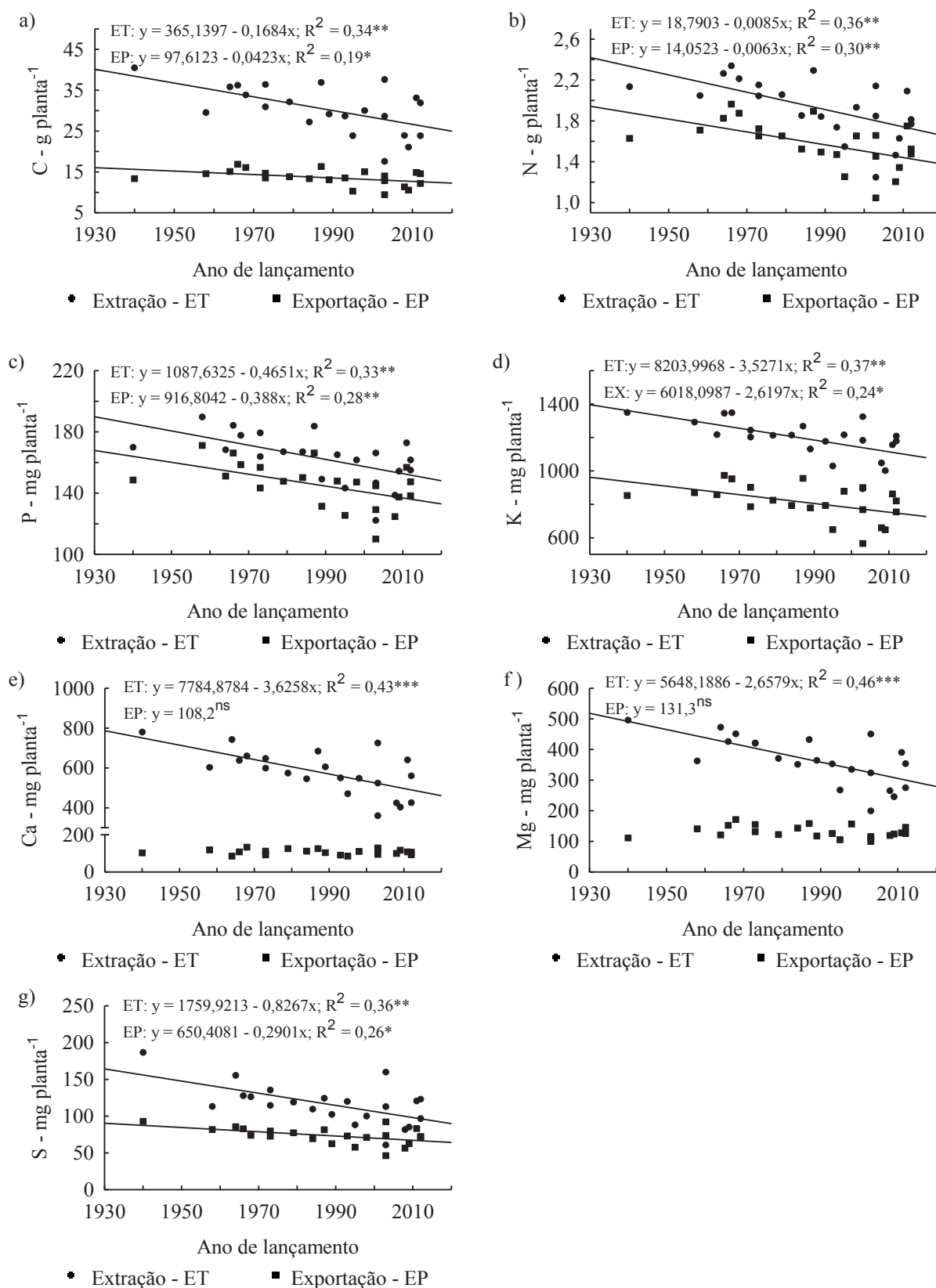


Figura 8. Extração e exportação dos macronutrientes carbono (a), nitrogênio (b), fósforo (c), potássio (d), cálcio (e), magnésio (f) e enxofre (g) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.



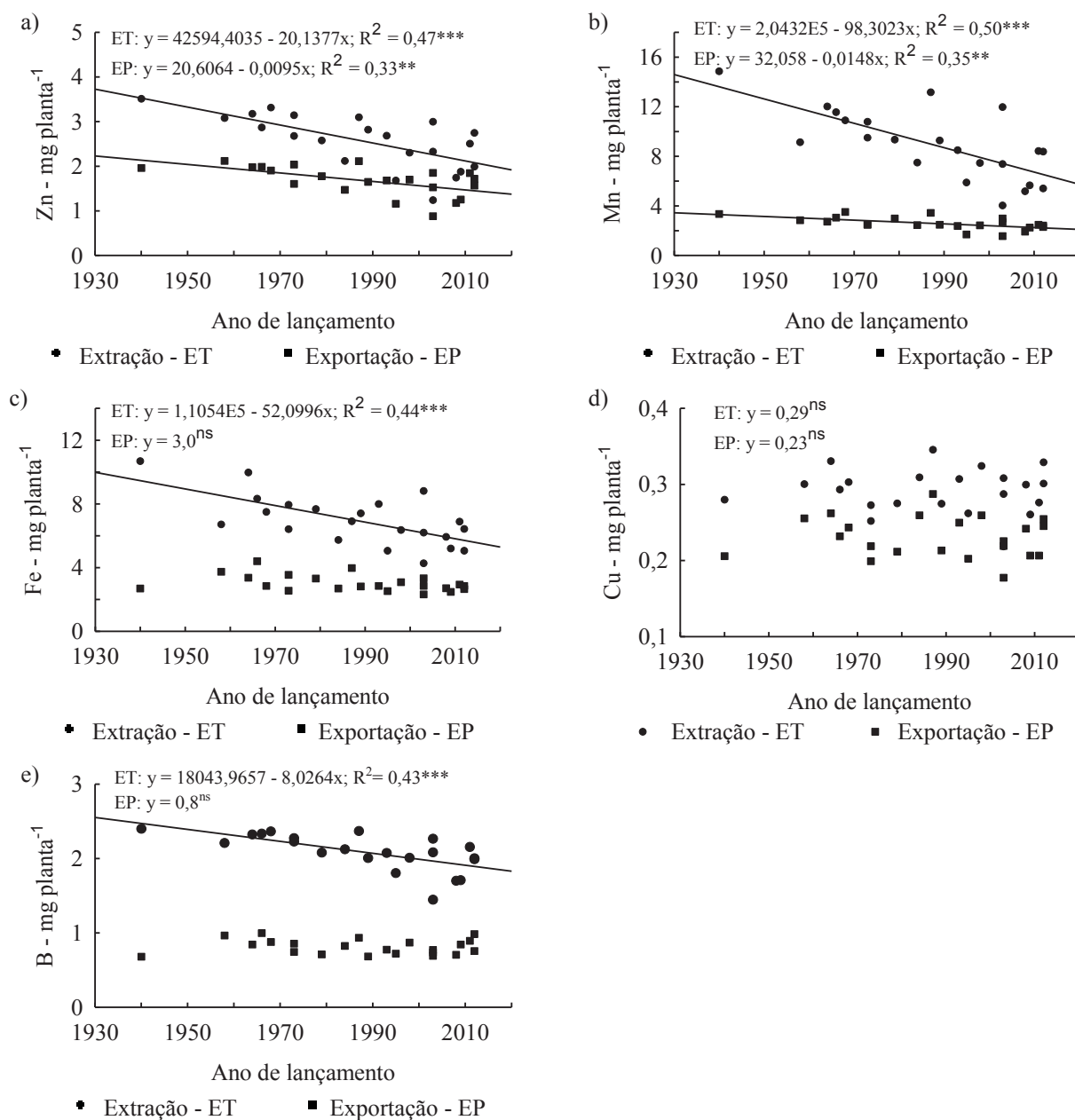


Figura 9. Extração e exportação dos micronutrientes zinco (a), manganês (b), ferro (c), cobre (d) e boro (e) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.



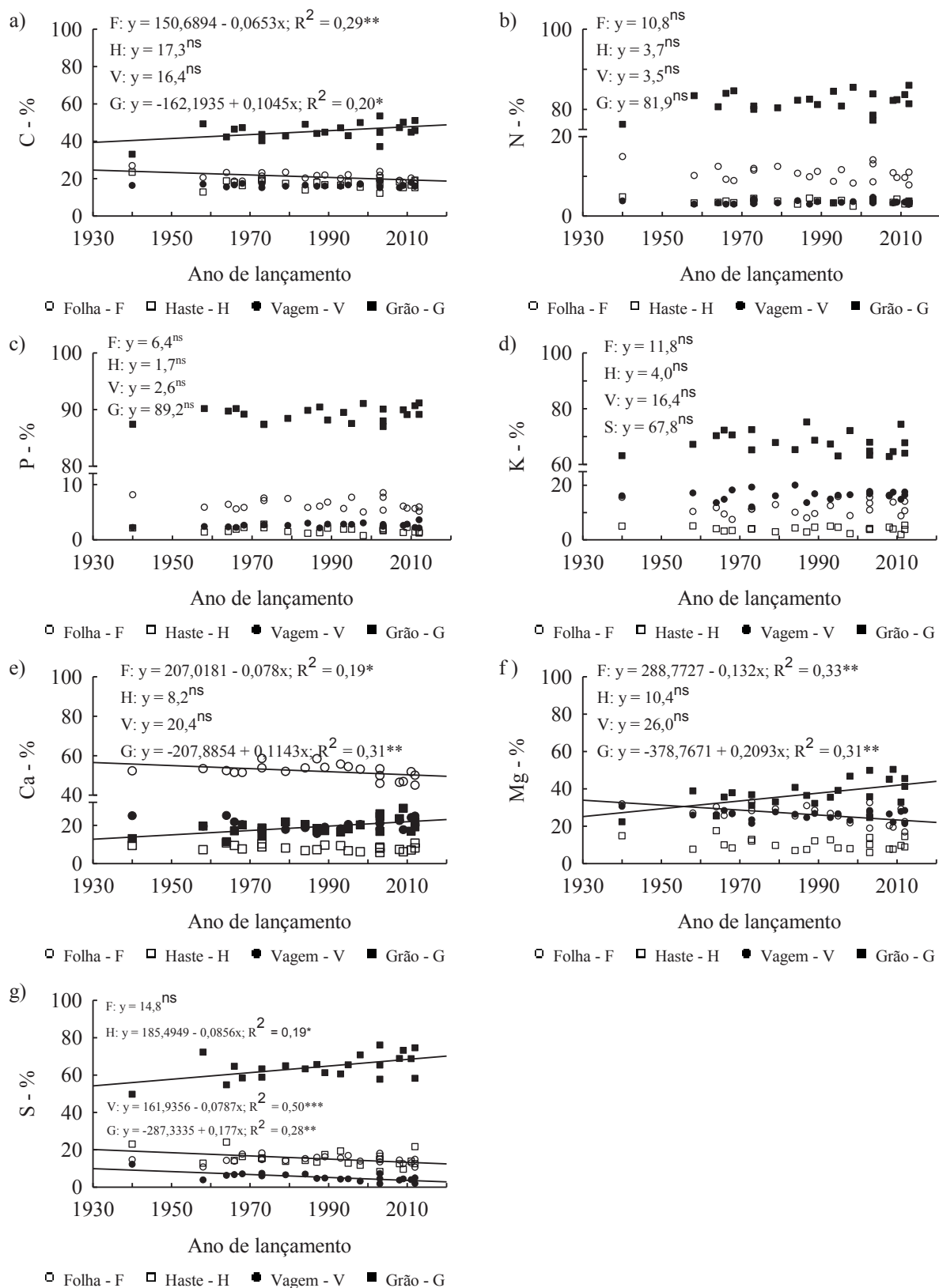


Figura 10. Índice de partição (IP) dos macronutrientes C (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f) e S (g) na folha (F), haste (H), vagem (V) e grão (G) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

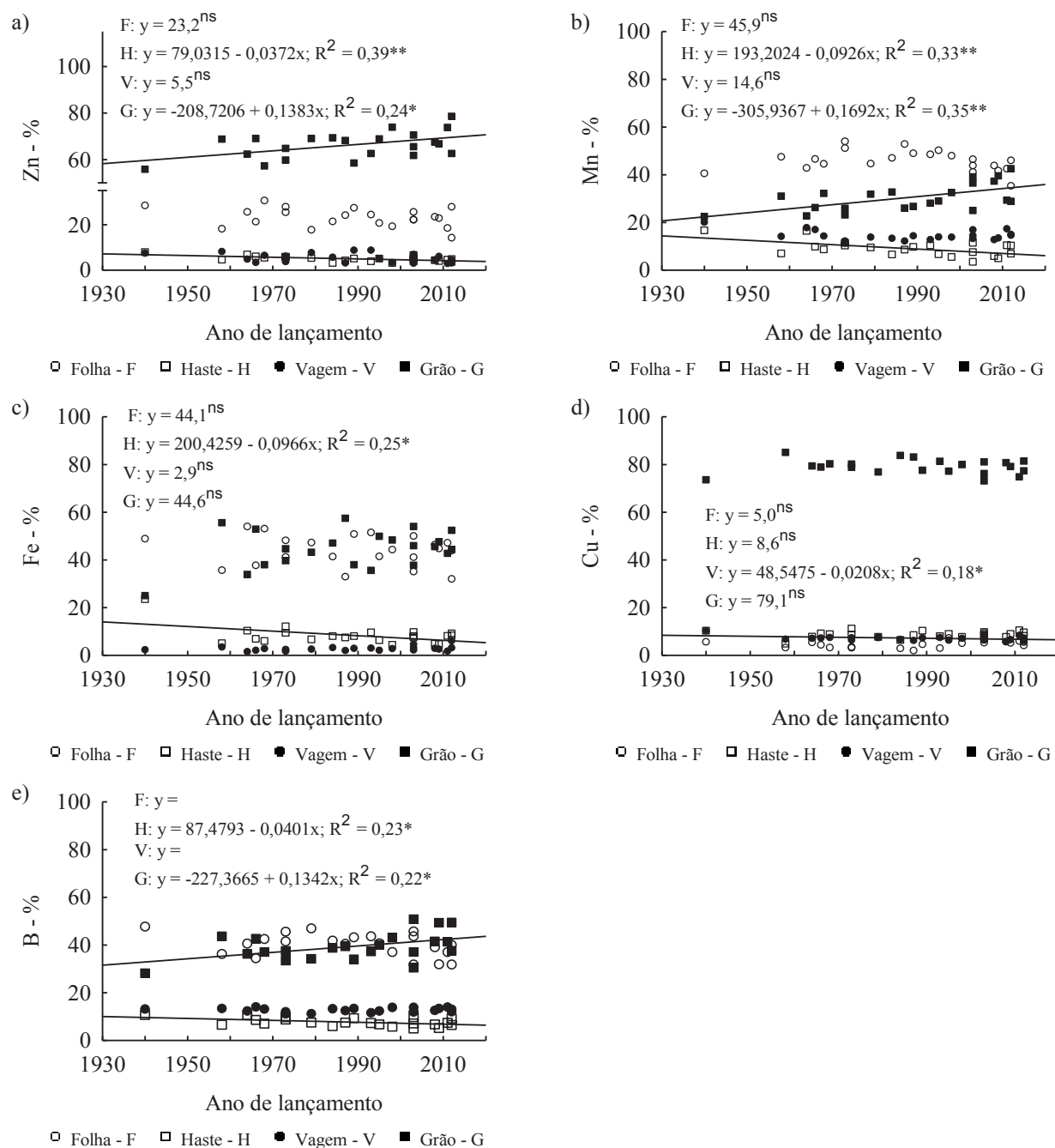


Figura 11. Índice de partição (IP) dos micronutrientes Zn (a), Mn (b), Fe (c), Cu (d) e B (e) na folha (F), haste (H), vagem (V) e grão (G) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

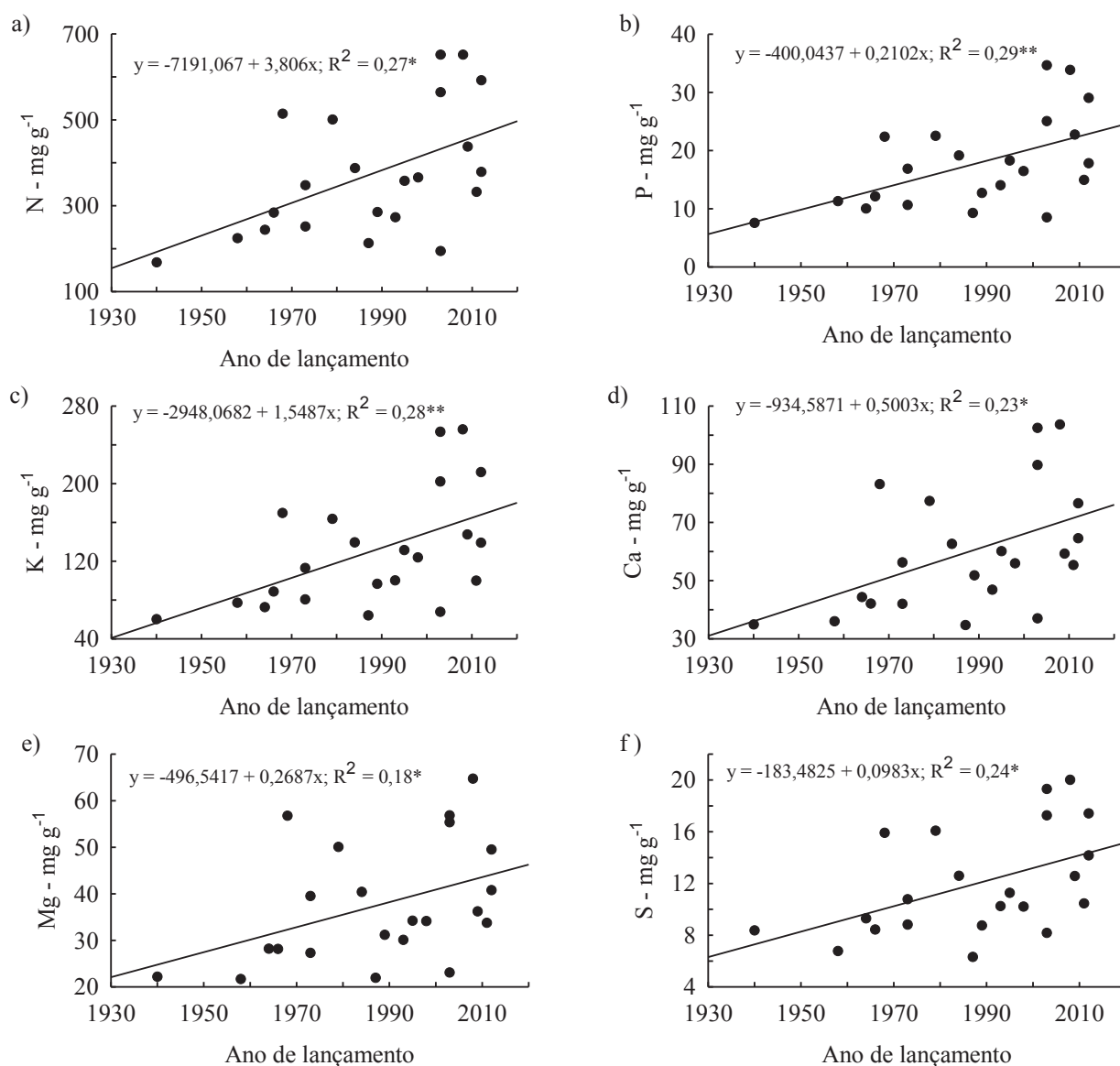


Figura 12. Eficiência de absorção radicular (EAR) dos macronutrientes N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

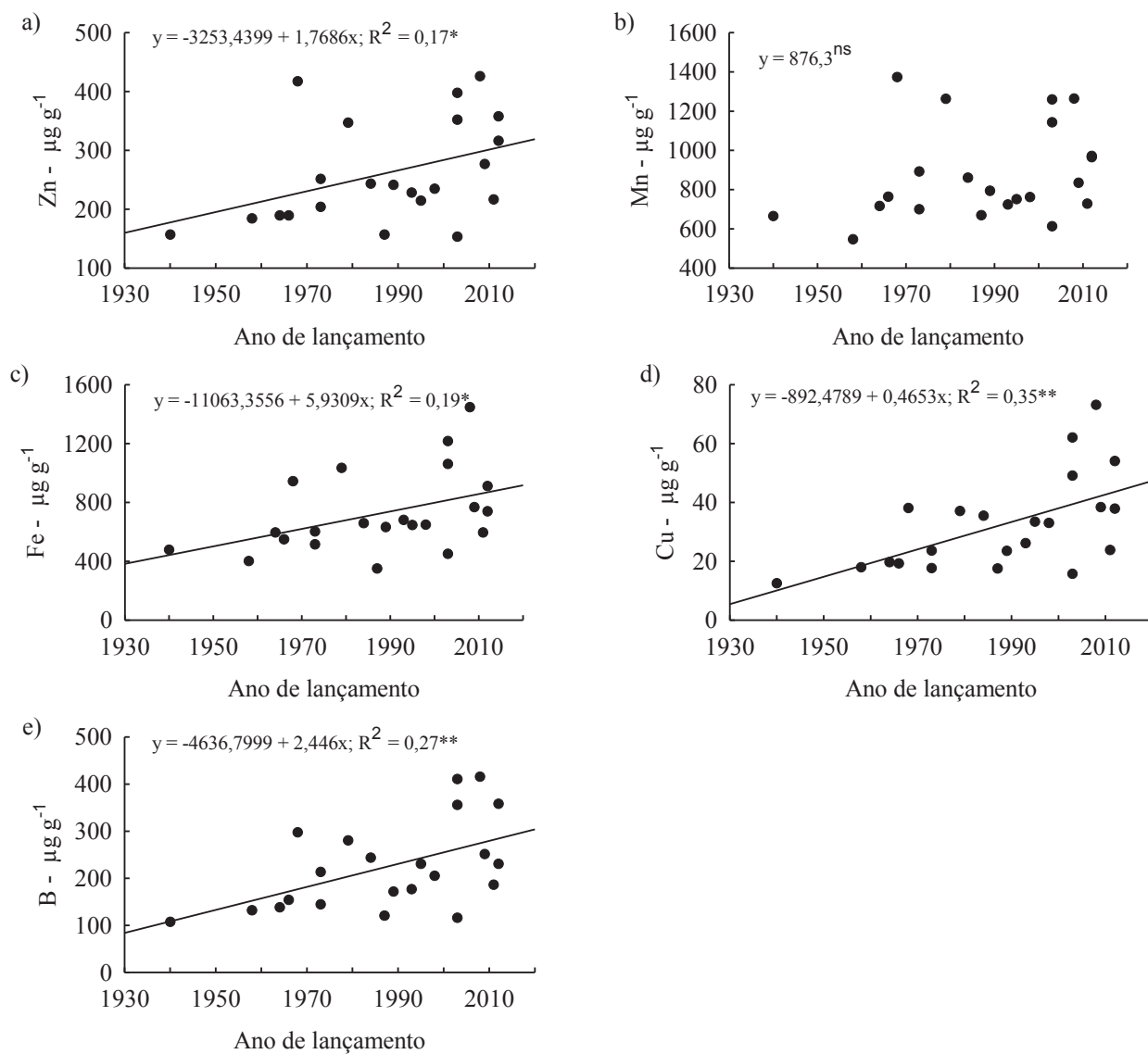


Figura 13. Eficiência de absorção radicular (EAR) dos micronutrientes Zn (a), Mn (b), Fe (c), Cu (d) e B (e) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

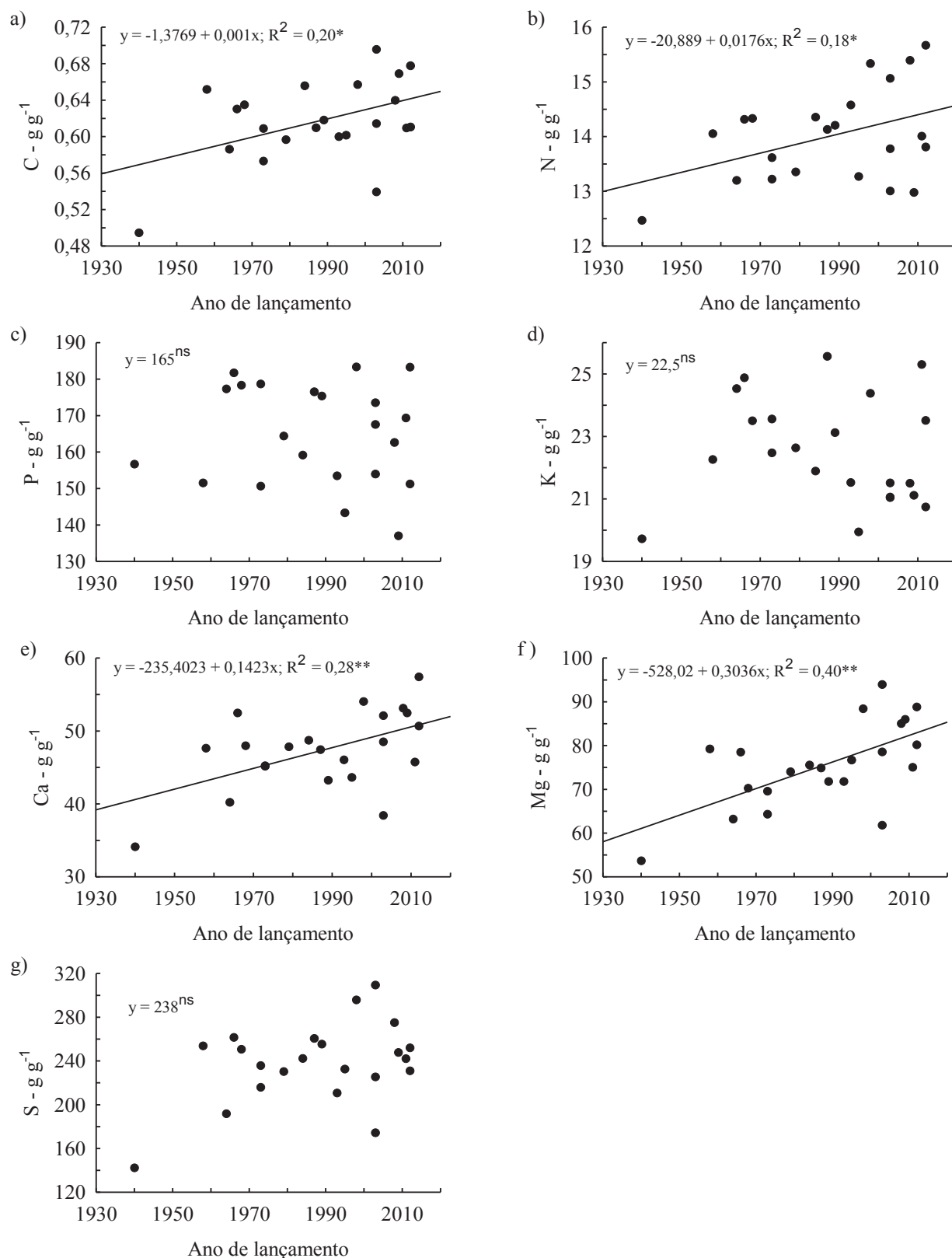


Figura 14. Eficiência de utilização (EU) dos macronutrientes C (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f) e S (g) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

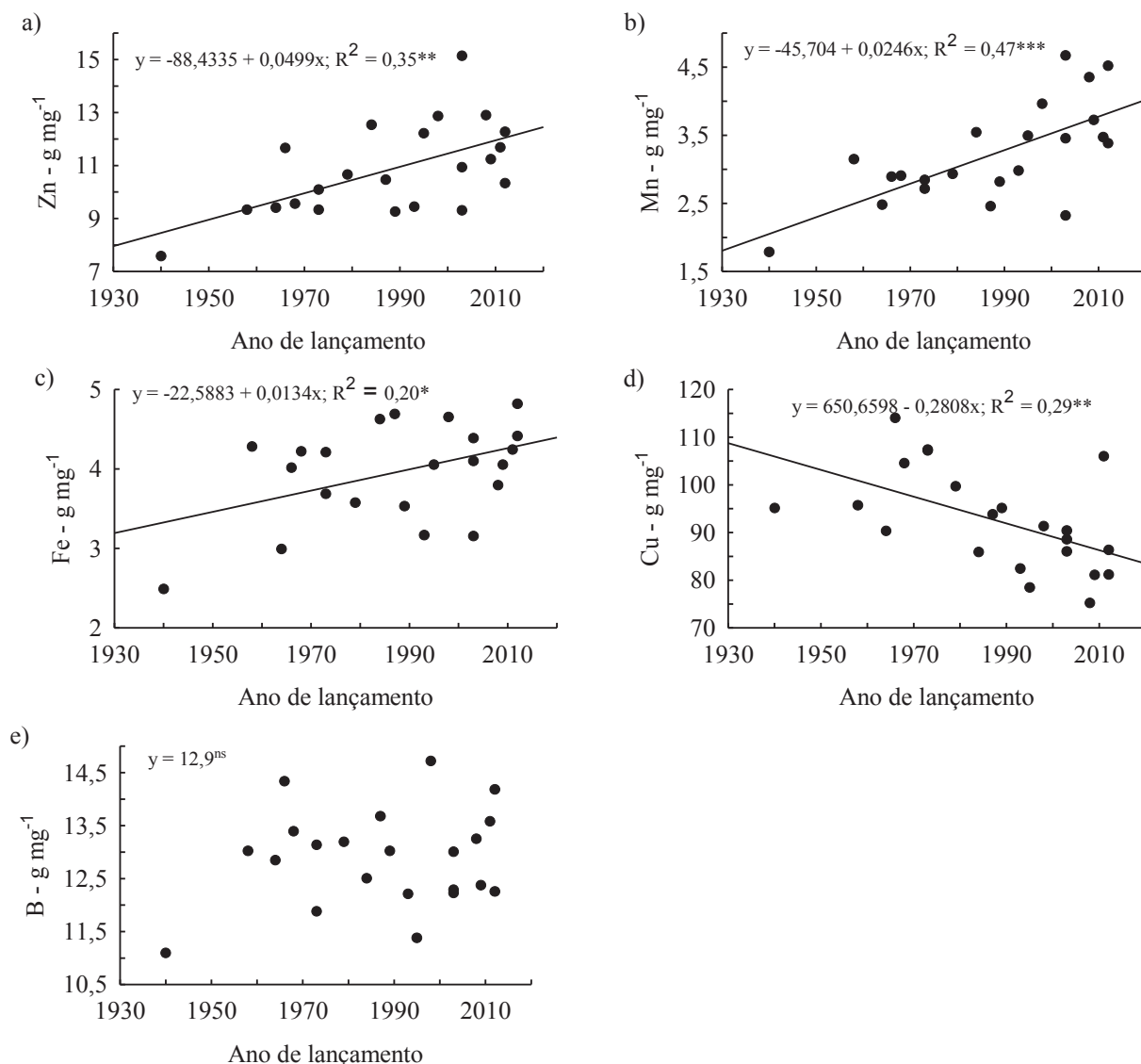


Figura 15. Eficiência de utilização (EU) dos micronutrientes Zn (a), Mn (b), Fe (c), Cu (d) e B (e) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

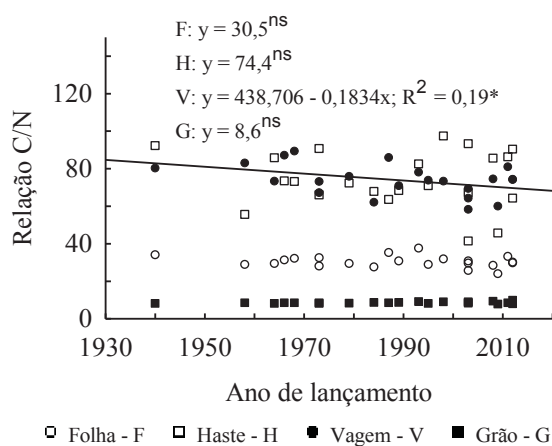


Figura 16. Relação C/N da folha (F), haste (H), vagem (V) e grão (G) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

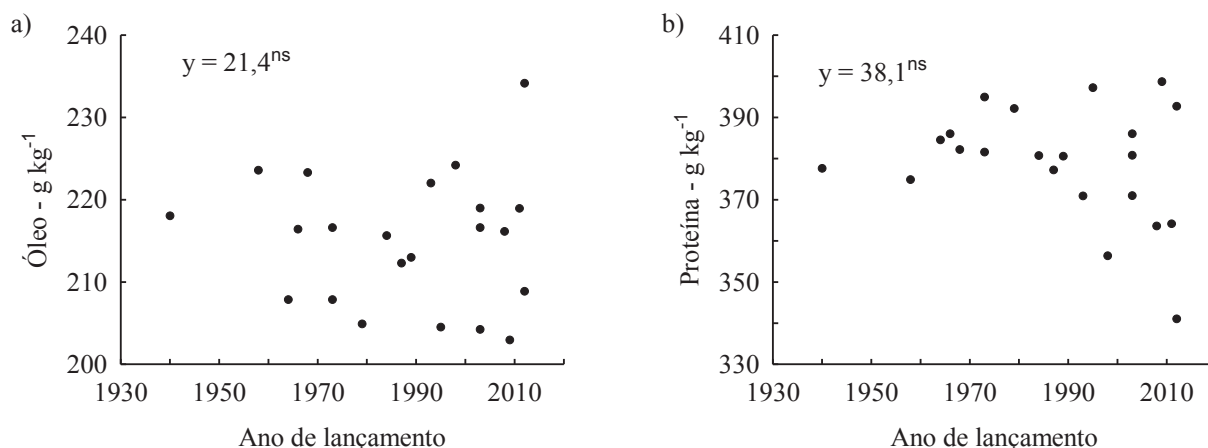


Figura 17. Teor de óleo (a) e proteína (b) de cultivares de soja cultivadas no Sul do Brasil de 1940 à 2016. \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ , ns = não significativo.

### 3.6 CONCLUSÕES

- (i) Os teores de carotenoide e clorofila a e b não foram modificados ao longo do tempo com o melhoramento genético. Assim como, a atividade enzimática da redutase do nitrato e urease;
- (ii) Apesar de proporcionar diminuição da extração para a maioria dos nutrientes, a seleção de cultivares para maiores produtividade influenciou na concentração de nutrientes nas diferentes partes da planta, aumentando ao longo dos anos a eficiência de absorção radicular para os nutrientes, exceção ao Mn, e a eficiência no uso dos nutrientes C, N, Ca, Mg, Zn, Mn e Fe para produção de grãos;
- (iii) Os teores de óleo e proteína nos grãos da soja não foram modificados com o lançamento de novas cultivares ao longo dos últimos 76 anos no sul do Brasil.

### REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. F.; MELO, V. D. F.; REISSMAN CB, KASEKER, J. F. Reserva Mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 1599–1610, 2013.
- AMTMANN, A.; TROUFFLARD, S.; ARMENGAUD, P. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 4, p. 682–691, 2008.
- ARNON, D. I. Cooper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, v. 24, p. 1-15, 1949.
- BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. B. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO; 1987.
- BATAGLIA, O. C.; MASCARENHAS, H. A. A.; TEIXEIRA, J. P. F.; TISSELI F. °, O. Acúmulo de matéria seca e nutrientes, em soja cultivar Santa-Rosa. **Bragantia**, v. 35, n. 2, p. 237–247, 1976.
- BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern Soybean Varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563–573, 2015.

BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. B. **A soja no Brasil**: história e estatística. Londrina: EMBRAPA-CNPSo; 1987.

BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **Cultivares que fizeram a história da soja no Rio Grande do Sul**. 1<sup>st</sup> ed. Passo Fundo-RS: Embrapa Trigo; 2002.

BORST, H. L.; THATCHER, L. E. Life history and composition of the soybean plant. Bulletin 494, 1931.

BRANCALIANO, S. R.; AGUIAR, A. T. D. E.; LIMONTA, C. R.; ROSSI, C. E.; CRISTOVÃO, N. N. Grain Yield and Composition of Soybean Crop After the Supply of Nitrogen With the Use of Cover Crops At Direct Sowing. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 69–75, 2015.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Function of Nutrients: Micronutrients. In: MARSCHNER'S. **Mineral Nutrition of High. Plants** Third Ed. 2011.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 168, n. 4, p. 521–530, 2005.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: Décimo Segundo levantamento/agosto de 2016. v.3, n. 11, p. 171.

DA-YONG, L.; ZHI-AN, Z.; DIAN-JUN, Z.; LI-YAN, J.; YUAN-LI, W. Comparison of Net Photosynthetic Rate in Leaves of Soybean with Different Yield Levels. **Journal of Northeast Agricultural University** (English Edition), v. 19, n. 3, p. 14–19, 2012.

DE FELIPE, M.; GERDE, J. A.; ROTUNDO, J. L. Soybean Genetic Gain in Maturity Groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. **Crop Science**, v. 12, n. december, p. 11–12, 2013.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja** - Região Central do Brasil 2005. Sistema de Produção. 2011.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. C. The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, n. 6, p. 1121–1157, 2008.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of Soybean Development. **Special report**, v. 80, n. March, p. 11, 1977.

GE, Z RUBIO, G LYNCH, J. P. The importance of root gravitropism for inter-root competition and phosphorus acquisition efficiency: results from a geometric simulation model. **CEUR Workshop Proceedings**, v. 218, p. 159–171, 2000.

GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LAUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Ed). **Inorganic plant nutrition**. Encyclopedia and plant physiology new series, v. 15B, 453–480. New York: Springer Verlag, 1983.



HATAM, M.; HUME, D. J. Relations Between Nitrate Reductase Activity and Nitrogen Accumulation in Soybeans. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 56, n. 2, p. 377–384, 1976.

HEWITT, E. J.; SMITH, T. A. **Plant mineral nutrition**. Londres, The English Universities Press, 1975.

HOGAN, M. E.; SWIFT, I. E.; DONE, J. Urease assay and ammonia release from leaf tissues. **Phytochemistry**, v. 22, n. 3, p. 663–667, 1983.

HOUX, J. H.; WIEBOLD, W. J.; FRITSCHI, F. B. Rotation and tillage affect soybean grain composition, yield, and nutrient removal. **Field Crops Research**, v. 164, p. 12–21, 2014.

JIN, J.; LIU, X.; WANG, G.; et al. Agronomic and physiological contributions to the yield improvement of soybean cultivars released from 1950 to 2006 in Northeast China. **Field Crops Research**, v. 115, n. 1, p. 116–123, 2010.

KUMUDINI, S.; HUME, D. J.; CHU, G. Genetic improvement in short season soybeans: I. Dry matter accumulation, partitioning, and leaf area duration. **Crop Science**, v. 41, n. 2, p. 391–398, 2001.

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement And Characterization by UV-VIS Spectroscopy. 2001.

MALAVOLTA, E. A. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres; 1980.

MCCULLOUGH, H. The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinica chimica acta**, v. 17, n. 2, p. 297–304, 1967.

MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. **A soja no Brasil**. 1<sup>st</sup> ed. Campinas, SP, 1981.

MORRISON, M. J.; VOLDENG, H. D.; COBER, E. R. Physiological Changes from 58 Years of Genetic Improvement of Short-Season Soybean Cultivars in Canada. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 4, p. 685, 1999.

MULDER, E. G.; BOXMA, R.; VEEN, W. L. V. The effect of molybdenum and nitrogen deficiencies on nitrate reduction in plant tissues. **Plant and Soil**, 10:335-355, 1959.

NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I. Evolução da fertilidade do solo do Planalto do Rio Grande do Sul nas últimas quatro décadas. Disponível em: <[www.plantiodireto.com.br](http://www.plantiodireto.com.br)> Acesso em 18 de dez. de 2016.

OCEPAR – Organização das Cooperativas do Estado do Paraná. **Resultados de pesquisa com soja nos anos de 1979/80 e 1980/81**. Cascavel, 1982.

OCEPAR – Organização das Cooperativas do Estado do Paraná. **Resultados de pesquisa com soja**. Cascavel, 1983.

PEDERSEN, P.; LAUER, J. G. Soybean growth and development in various management systems and planting dates. **Crop Science**, v. 44, n. 2, p. 508–515, 2004.

PIPER, E. L.; BOOTE, K. J. Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. **Journal of the American Oil Chemists Society**. 1999;76:1233–1241.

ROGERS, J.; CHEN, P.; SHI, A.; et al. Agronomic performance and genetic progress of selected historical soybean varieties in the southern USA. **Plant Breeding**, v. 134, n. 1, p. 85–93, 2015.

RUBIO, G.; WALK, T.; GE, Z.; et al. Root Gravitropism and Below-ground Competition among Neighbouring Plants: A Modelling Approach. **Annals of Botany**, v. 88, n. 5, p. 929–940, 2001.

SILVA, F. C. Análise química do tecido vegetal. In: **Manual de Análises Químicas de Solo, Plantas e Fertilizantes**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 193-304, 2009.

SPECHT, J. E.; DIERS, B. W.; NELSON, R. L.; FRANCISCO, J.; TOLEDO, F.; TORRION, J. A.; GRASSINI, P. Soybean. In: SMITH, S.; DIERS, B.; SPECHT, J.; CARVER, B. (Ed). **Yield gains in major U.S. field crops**. CSSA special publication 33. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, p. 311–356, 2014.

THIBODEAU, P. S.; JAWORSKI, E. G. Patterns of nitrogen utilization in the soybean. **Planta**, v. 127, n. 2, p. 133–147, 1975.

TODD, C. D.; POLACCO, J. C. Soybean cultivars “Williams 82” and “Maple Arrow” produce both urea and ammonia during ureide degradation. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 398, p. 867–877, 2004.

VERNETTI, F. J. **Soja, genética e melhoramento**. Fundação Cargill, 1983.

WARAICH, E. A.; AHMAD, R.; SAIFULLAH; ASHRAF, M. Y.; EHSANULLAH. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 6, p. 764–777, 2011.

WELCH, R. M. Linkages between trace elements in food crops and human health. In: ALLOWAY, B. J. **Micronutrient deficiencies in global crop production**, 1<sup>st</sup> ed. New York: Springer, p. 287–309, 2008.

ZHAO, J.; FU, J.; LIAO, H.; et al. Characterization of root architecture in an applied core collection for phosphorus efficiency of soybean germplasm. **Chinese Science Bulletin**, v. 49, n. 15, p. 1611–1620, 2004.

#### 4 CONCLUSÃO GERAL

A partir dos dados obtidos neste trabalho, conclui-se que o melhoramento genético proporcionou redução da área foliar e diâmetro da haste, e incrementos na eficiência acumulação de matéria seca para o grão e na parte reprodutiva, ocasionada pela diminuição da matéria seca de raiz. O rendimento apresentou relação com o número de grão planta<sup>-1</sup>, vagem planta<sup>-1</sup>, nó reprodutivo planta<sup>-1</sup> e nó planta<sup>-1</sup>. As características fisiológicas não tiveram alteração com a seleção de cultivares para altas produtividades. A concentração, extração, exportação, partição, eficiência de absorção radicular e utilização de nutrientes nas diferentes partes da planta apresentaram mudança com o melhoramento genético. Porém, os teores de óleo e proteína não tiveram diferença, mas apresentam alta variabilidade nas cultivares modernas.

## REFERÊNCIAS GERAL

- ABRÀMOFF, M. D.; MAGALHÃES, P. J.; RAM, S. J. Image Processing with ImageJ. **Biophotonics International**, v. 11, n. 7, p. 36–42, 2004.
- ALLIPRANDINI, E. A. Ganho genético em soja no estado do Paraná, via melhoramento, no período de 1985/86 a 1989/90. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 28, n. 4, p. 489–497, 1993.
- ALVES, J. M. F.; MELO, V. D. F.; REISSMAN CB, KASEKER, J. F. Reserva Mineral de potássio em Latossolo cultivado com Pinus taeda L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 1599–1610, 2013.
- AMTMANN, A.; TROUFFLARD, S.; ARMENGAUD, P. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 4, p. 682–691, 2008.
- ARNON, D. I. Cooper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in Beta vulgaris. **Plant Physiology**, v. 24, p. 1-15, 1949.
- BALL, R. A.; MCNEW, R. W.; VORIES, E. D.; KEISLING, T. C.; PURCELL, L. C. Path analyses of population density effects on short-season soybean yield. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 1, p. 187–195, 2001.
- BATAGLIA, O. C.; MASCARENHAS, H. A. A.; TEIXEIRA, J. P. F.; TISSELI F. °, O. Acúmulo de matéria seca e nutrientes, em soja cultivar Santa-Rosa. **Bragantia**, v. 35, n. 2, p. 237–247, 1976.
- BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern Soybean Varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563–573, 2015.
- BOARD, J. E.; MODALI, H. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. **Crop Science**, v. 45, n. 5, p. 1790–1799, 2005.
- BOERMA, H. R. Comparison of Past and Recently Developed Soybean Cultivars in Maturity Groups. **Crop Science**, v. 19, p. 611–613 , 1979.
- BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. B. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1987.
- BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **Cultivares que fizeram a história da soja no Rio Grande do Sul**. 1<sup>st</sup> ed. Passo Fundo-RS: Embrapa Trigo; 2002.
- BORST, H. L.; THATCHER, L. E. Life history and composition of the soybean plant. Bulletin 494. , 1931.
- BRANCALIANO, S. R.; AGUIAR, A. T. D. E.; LIMONTA, C. R.; ROSSI, C. E.; CRISTOVÃO, N. N. Grain Yield and Composition of Soybean Crop After the Supply of Nitrogen With the Use of Cover Crops At Direct Sowing. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 69–75, 2015.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Function of Nutrients: Micronutrients. In: MARSCHNER'S. **Mineral Nutrition of High. Plants** Third Ed. 2011.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 168, n. 4, p. 521–530, 2005.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Décimo Primeiro levantamento/agosto de 2016. v.3, n. 11, p. 171.

CONNOR, D. J.; LOOMIS, R. S.; CASSMAN, K. G. Community concepts. In: **Crop ecology: productivity and management in agricultural systems**. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press, p. 44-70, 2011.

CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271–276, 2013.

CUI, S. Y.; YU, D. Y. Estimates of relative contribution of biomass, harvest index and yield components to soybean yield improvements in China. **Plant Breeding**, v. 124, n. 5, p. 473–476, 2005.

CUI, X.; DONG, Y.; GI, P.; et al. Relationship between root vigour, photosynthesis and biomass in soybean cultivars during 87 years of genetic improvement in the northern China. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 81–86, 2016.

D'UTRA, G. **Soja**. *Jornal do agricultor*, v. 7, n. Rio de Janeiro, p. 185–188, 1882.

DA-YONG, L.; ZHI-AN, Z.; DIAN-JUN, Z.; LI-YAN, J.; YUAN-LI, W. Comparison of Net Photosynthetic Rate in Leaves of Soybean with Different Yield Levels. **Journal of Northeast Agricultural University** (English Edition), v. 19, n. 3, p. 14–19, 2012.

DE BRUIN, J. L.; PEDERSEN, P. Growth, yield, and yield component changes among old and new soybean cultivars. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 1, p. 124–130, 2009.

EDWARDS, J. T.; PURCELL, L. C. Soybean yield and biomass responses to increasing plant population among diverse maturity groups: I. Agronomic characteristics. **Crop Science**, v. 45, n. 5, p. 1770–1777, 2005.

EGLI, D.B.; GUFFY, R.D. ; LEGGETT, J. E. Partitioning of Assimilate Between Vegetative and Reproductive Growth in Soybean. **Agronomy Journal**, v. 77, n. 59, p. 917–922, 1985.

EGLI, D. B. Cultivar maturity and potential yield of soybean. **Field Crops Research**, v. 32, p. 147–158, 1993.

EGLI, D. B. Yield components-regulation by the seed.. In **Seed biology and the yield of grain crops**. CAB Int., New York; p. 70–112, 1998.

EGLI, D. B. Comparison of Corn and Soybean Yields in the United States : Historical Trends and Future Prospects. **Agronomy Journal** , p. 79–88, 2008.

EGLI, D. B.; ZHEN-WEN, Y. Crop Growth Rate and Seeds per Unit Area in Soybean. **Crop Science**, v. 31, p. 439, 1991.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja** - Região Central do Brasil 2005. Sistema de Produção. 2011.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. C. The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, n. 6, p. 1121–1157, 2008.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of Soybean Development. **Special report**, v. 80, n. March, p. 11, 1977.

FELIPE, M.; GERDE, J. A.; ROTUNDO, J. L. Soybean Genetic Gain in Maturity Groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. **Crop Science**, v. 12, n. december, p. 11–12, 2013.

GE, Z RUBIO, G LYNCH, J. P. The importance of root gravitropism for inter-root competition and phosphorus acquisition efficiency: results from a geometric simulation model. **CEUR Workshop Proceedings**, v. 218, p. 159–171, 2000.

GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LAUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Ed). **Inorganic plant nutrition**. Encyclopedia and plant physiology new series, v. 15B, 453–480. New York: Springer Verlag, 1983.

HAMMOND, L. C.; BLACK, C. A.; NORMAN, A. G. Nutrient uptake by soybeans on two Iowa soils. **Agricultural Experiment Station**, Iowa state. 1951; 384:463-512.

HATAM, M.; HUME, D. J. Relations Between Nitrate Reductase Activity and Nitrogen Accumulation in Soybeans. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 56, n. 2, p. 377–384, 1976.

HEWITT, E. J.; SMITH, T. A. **Plant mineral nutrition**. Londres, The English Universities Press, 1975.

HOGAN, M. E.; SWIFT, I. E.; DONE, J. Urease assay and ammonia release from leaf tissues. **Phytochemistry**, v. 22, n. 3, p. 663–667, 1983.

HOLLAND, M. A.; GRIFFIN, J. D.; ELISE MEYER-BOTHLING, L.; POLACCO, J. C. Developmental genetics of the soybean urease isozymes. **Developmental Genetics**, v. 8, n. 5–6, p. 375–387, 1987.

HOUX, J. H.; WIEBOLD, W. J.; FRITSCHI, F. B. Rotation and tillage affect soybean grain composition, yield, and nutrient removal. **Field Crops Research**, v. 164, p. 12–21, 2014.

JIN, J.; LIU, X.; WANG, G.; et al. Agronomic and physiological contributions to the yield improvement of soybean cultivars released from 1950 to 2006 in Northeast China. **Field Crops Research**, v. 115, n. 1, p. 116–123, 2010.

- KAHLON, C. S.; BOARD, J. E. Contribution of Remobilized Total Dry Matter to Soybean Yield Contribution of Remobilized Total Dry Matter. **Journal of Crop Improvement**, v. 26, p. 641–654, 2012.
- KAHLON, C. S.; BOARD, J. E.; KANG, M. S. An Analysis of Yield Component Changes for New vs. Old Soybean Cultivars. **Agronomy Journal**, p. 13–22, 2011.
- KASTER, M.; QUEIROZ, E. F.; TERESAWA, F.; DOLDATELLI, D. Introdução e evolução da soja no Brasil. 4. No Estado do Paraná. In: Miyasaka, S.; Medina, J. C. (Ed.). **A soja no Brasil**. 1st ed. Campinas: São Paulo; 1981. p.22-24.
- KOESTER, R. P.; SKONECZKA, J. A.; CARY, T. R.; DIERS, B. W.; AINSWORTH, E. A. Historical gains in soybean (*Glycine max* Merr.) seed yield are driven by linear increases in light interception, energy conversion, and partitioning efficiencies. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 12, p. 3311–3321, 2014.
- KUMUDINI, S.; HUME, D. J.; CHU, G. Genetic improvement in short season soybeans: I. Dry matter accumulation, partitioning, and leaf area duration. **Crop Science**, v. 41, n. 2, p. 391–398, 2001.
- KUMUDINI, S.; HUME, D. J.; CHU, G. Genetic improvement in short season soybeans. **Crop Science**, v. 42, p. 141-145, 2002.
- LANGE, C. E.; FEDERIZZI, L. C. Estimation of soybean genetic progress in the South of Brazil using multi-environmental yield trials. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 3, p. 309–316, 2009.
- LI, Y.; ZHAO, S.; MA, J.; LI, D.; YAN, L.; LI, J.; QI, X.; GUO, X.; ZHANG, L.; HE, W.; CHANG, R.; LIANG, Q.; GUO, Y.; YE, C.; WANG, X.; TAO, Y.; GUAN, R.; WANG, J.; LIU, Y.; JIN, L.; ZHANG, X.; LIU, Z.; ZHANG, L.; CHEN, J.; WANG, K.; NIELSEN, R.; LI, R.; CHEN, P.; LI, W.; REIF, J. C.; PURUGGANAN, M.; WANG, J.; ZHANG, M.; WANG, J.; QIU, L. Molecular footprints of domestication and improvement in soybean revealed by whole genome re-sequencing. **BMC genomics**, v. 14, n. 1, p. 579, 2013.
- MALAVOLTA, E. A. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 251p, 1980.
- MAGALHÃES, C. M. Introdução e evolução da soja no Brasil: no estado do Rio Grande do Sul. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Ed.). **A soja no Brasil**. 1<sup>st</sup> ed. Campinas: São Paulo; 1981. p.18-20.
- MCCULLOUGH, H. The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinica chimica acta**, v. 17, n. 2, p. 297–304, 1967.
- MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. **A soja no Brasil**. 1<sup>st</sup> ed. Campinas, SP, p. 1062, 1981.
- MORRISON, M. J.; VOLDENG, H. D.; COBER, E. R. Physiological Changes from 58 Years of Genetic Improvement of Short-Season Soybean Cultivars in Canada. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 4, p. 685, 1999.
- MULDER, E. G.; BOXMA, R.; VEEN, W. L. V. The effect of molybdenum and nitrogen deficiencies on nitrate reduction in plant tissues. **Plant and Soil**, 10:335-355, 1959.



NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I. Evolução da fertilidade do solo do Planalto do Rio Grande do Sul nas últimas quatro décadas. Disponível em: <[www.plantiodireto.com.br](http://www.plantiodireto.com.br)> Acesso em 18 de dez. de 2016.

OCEPAR – Organização das Cooperativas do Estado do Paraná. **Resultados de pesquisa com soja nos anos de 1979/80 e 1980/81**. Cascavel, p. 109, 1982.

OCEPAR – Organização das Cooperativas do Estado do Paraná. **Resultados de pesquisa com soja**. Cascavel, p. 60, 1983.

PEDERSEN, P.; LAUER, J. G. Soybean growth and development in various management systems and planting dates. **Crop Science**, v. 44, n. 2, p. 508–515, 2004a.

PEDERSEN, P.; LAUER, J. G. Response of soybean yield components to management system and planting date. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 5, p. 1372–1381, 2004b.

PERINI, L.; SILVA FONSECA, N. DA; DESTRO, D.; PRETE, C. E. C. Componentes da produção em cultivares de soja com crescimento determinado e indeterminado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. SUPPL.1, p. 2531–2544, 2012.

PIPER, E. L.; BOOTE, K. J. Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. **Journal of the American Oil Chemists Society**. 1999;76:1233–1241.

POLACCO, J. C.; SPARKS, R. B. Patterns of urease synthesis in developing soybeans. **Plant physiology**, v. 70, p. 189–194, 1982.

RAMTEKE, R.; GUPTA, G. K.; MURLIDHARAN, P.; SHARMA, S. K. Genetic progress of soybean varieties released during 1969 to 2008 in India Genetic progress of soybean varieties released during 1969 to 2008. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 71, n. 4, 333–340, 2011.

RINCKER, K.; NELSON, R.; SPECHT, J.; SLEPER, D.; CARY, T.; CIANZIO, S. R.; CASTEEL, S.; CONLEY, S.; CHEN, P.; DAVIS, V.; FOX, C.; GRAEF, G.; GODSEY, C.; HOLSHOUSE, D.; JIANG, G. L.; KANTARTZI, S. K.; KENWORTHY, W.; LEE, C.; MIAN, R.; MCHALE, L.; NAEVE, S.; ORF, J.; POYSA, V.; SCHAPAUGH, W.; SHANNON, G.; UNIA TOWSKI, R.; WANG, D.; DIERS, B. Genetic Improvement of U.S. Soybean in Maturity Groups II, III, and IV. **Crop Science**, v. 54, n. 4, p. 1419–1432, 2014.

ROGERS, J.; CHEN, P.; SHI, A.; et al. Agronomic performance and genetic progress of selected historical soybean varieties in the southern USA. **Plant Breeding**, v. 134, n. 1, p. 85–93, 2015.

ROWNTREE, S. C.; SUHRE, J. J.; WEIDENBENNER, N. H.; et al. Genetic Gain × Management Interactions in Soybean: I. Planting Date. **Crop Science**, v. 53, n. 3, p. 1128, 2013.

ROWNTREE, S. C.; SUHRE, J. J.; WEIDENBENNER, N. H.; et al. Physiological and phenological responses of historical soybean cultivar releases to earlier planting. **Crop Science**, v. 54, n. 2, p. 804–816, 2014.



RUBIO, G.; WALK, T.; GE, Z.; et al. Root Gravitropism and Below-ground Competition among Neighbouring Plants: A Modelling Approach. **Annals of Botany**, v. 88, n. 5, p. 929–940, 2001.

SILVA, F. C. Análise química do tecido vegetal. In: **Manual de Análises Químicas de Solo, Plantas e Fertilizantes**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 193-304, 2009.

SPECHT, J. E.; DIERS, B. W.; NELSON, R. L.; FRANCISCO, J.; TOLEDO, F.; TORRION, J. A.; GRASSINI, P.; Soybean. IN: SMITH, S.; DIERS, B.; SPECHT, J.; CARVER, B. (Ed.). **Yield gains in major U.S. field crops**. CSSA special publication 33. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 311–356, 2014.

SUHRE, J. J.; WEIDENBENNER, N. H.; ROWNTREE, S. C.; et al. Soybean yield partitioning changes revealed by genetic gain and seeding rate interactions. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 5, p. 1631–1642, 2014.

THIBODEAU, P. S.; JAWORSKI, E. G. Patterns of nitrogen utilization in the soybean. **Planta**, v. 127, n. 2, p. 133–147, 1975.

TODD, C. D.; POLACCO, J. C. Soybean cultivars “Williams 82” and “Maple Arrow” produce both urea and ammonia during ureide degradation. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 398, p. 867–877, 2004.

USTUN, A.; ALLEN, F. L.; ENGLISH, B. C. Genetic progress in soybean of the U.S. Midsouth. **Crop Science**, v. 41, n. 4, p. 993–998, 2001.

VERNETTI, F. J. **Soja, genética e melhoramento**. Fundação Cargill, 1983. 990 p.

WARAICH, E. A.; AHMAD, R.; SAIFULLAH; ASHRAF, M. Y.; EHSANULLAH. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 6, p. 764–777, 2011.

WELCH, R. M. Linkages between trace elements in food crops and human health. In: ALLOWAY, B. J. **Micronutrient deficiencies in global crop production**, 1<sup>st</sup> ed. New York: Springer, p. 287–309, 2008.

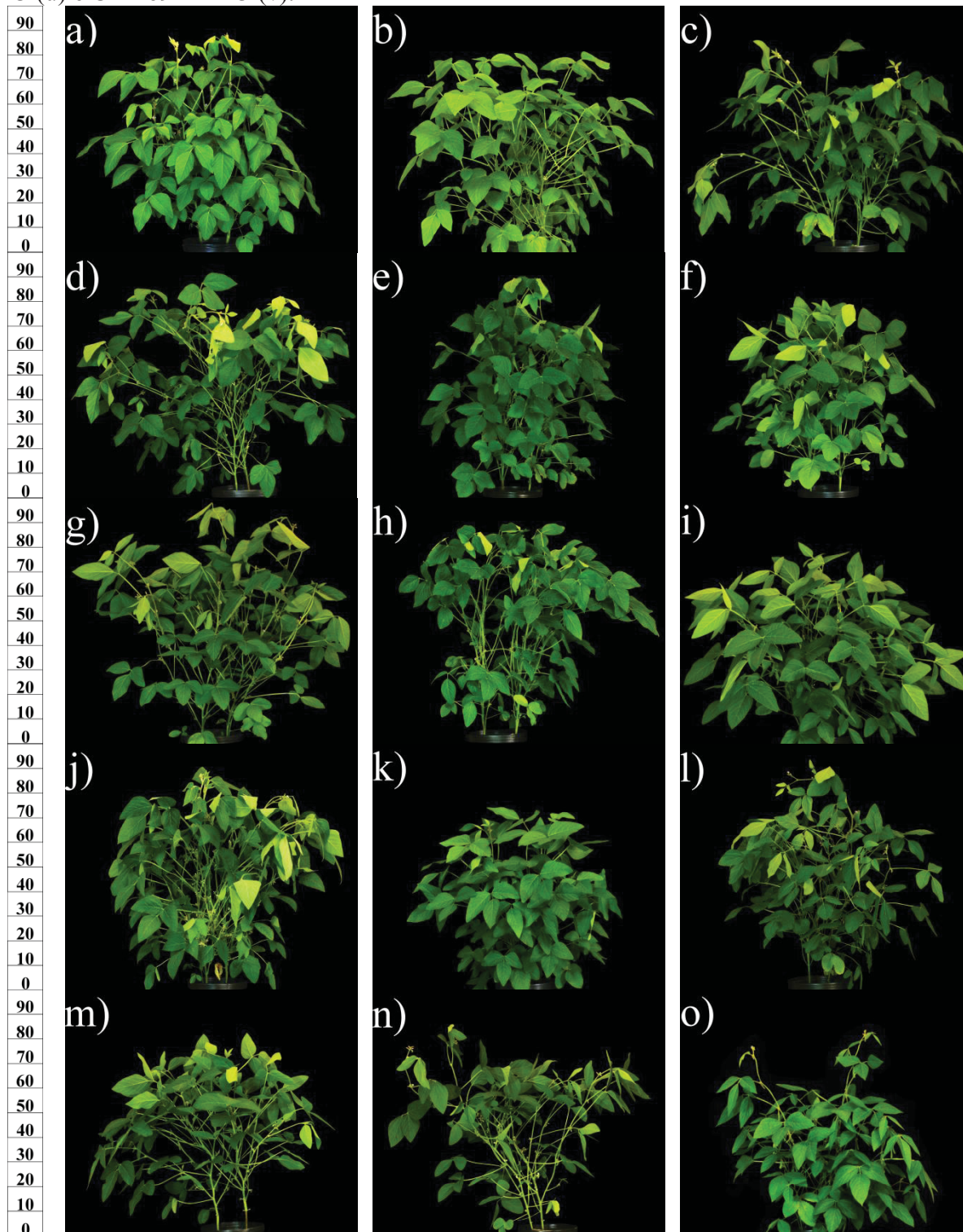
WILCOX, J. R.; MERR, L. Sixty Years of Improvement in Publicly Developed Elite Soybean Lines. **Crop Science**, v. 49, p. 1711–1716, 2001.

WILSON, E. W.; ROWNTREE, S. C.; SUHRE, J. J.; et al. Genetic gain × management interactions in soybean: II. nitrogen utilization. **Crop Science**, v. 54, n. 1, p. 340–348, 2014.

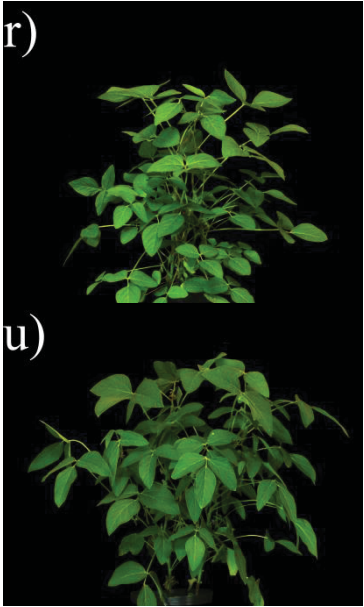
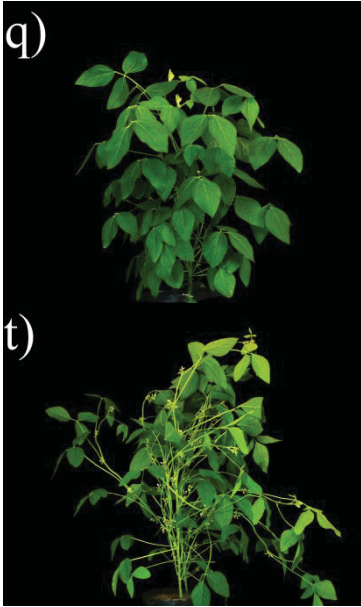
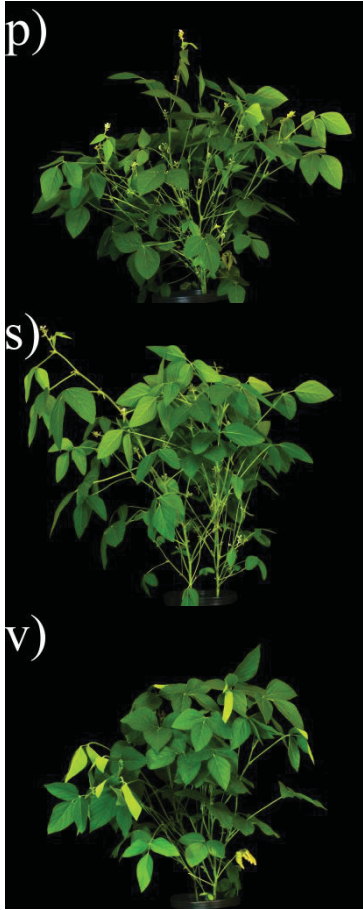
ZHAO, J.; FU, J.; LIAO, H.; et al. Characterization of root architecture in an applied core collection for phosphorus efficiency of soybean germplasm. **Chinese Science Bulletin**, v. 49, n. 15, p. 1611–1620, 2004.

# **APÊNDICE 1 - MORFOLOGIA DAS CULTIVARES NO PERÍODO VEGETATIVO DE SOJA CULTIVADO NO SUL DO BRASIL.**

Registradas no estágio reprodutivo, tendo como escala de comparação régua graduada em centímetros. Em ordem cronológica, partindo da cultivar mais antiga, Amarela Comum (a), Bienville (b), Santa Rosa (c), Bragg (d), Flórida (e), São Luiz (f), Bossier (g), BR-4 (h), CEP-12 (i), Cambará (j), BR-16 (k), FT-Abyara (l), FT-Saray (m), Fepagro RS-10 (n), CD 202 (o), CD 216 (p), CD 214 RR (q), CD 219 RR (r), BRS ativa RR (s), TMG 1066 RR (t), CD 202 RR (u), CD 2590 (v) e CD 2694 IPRO (w).

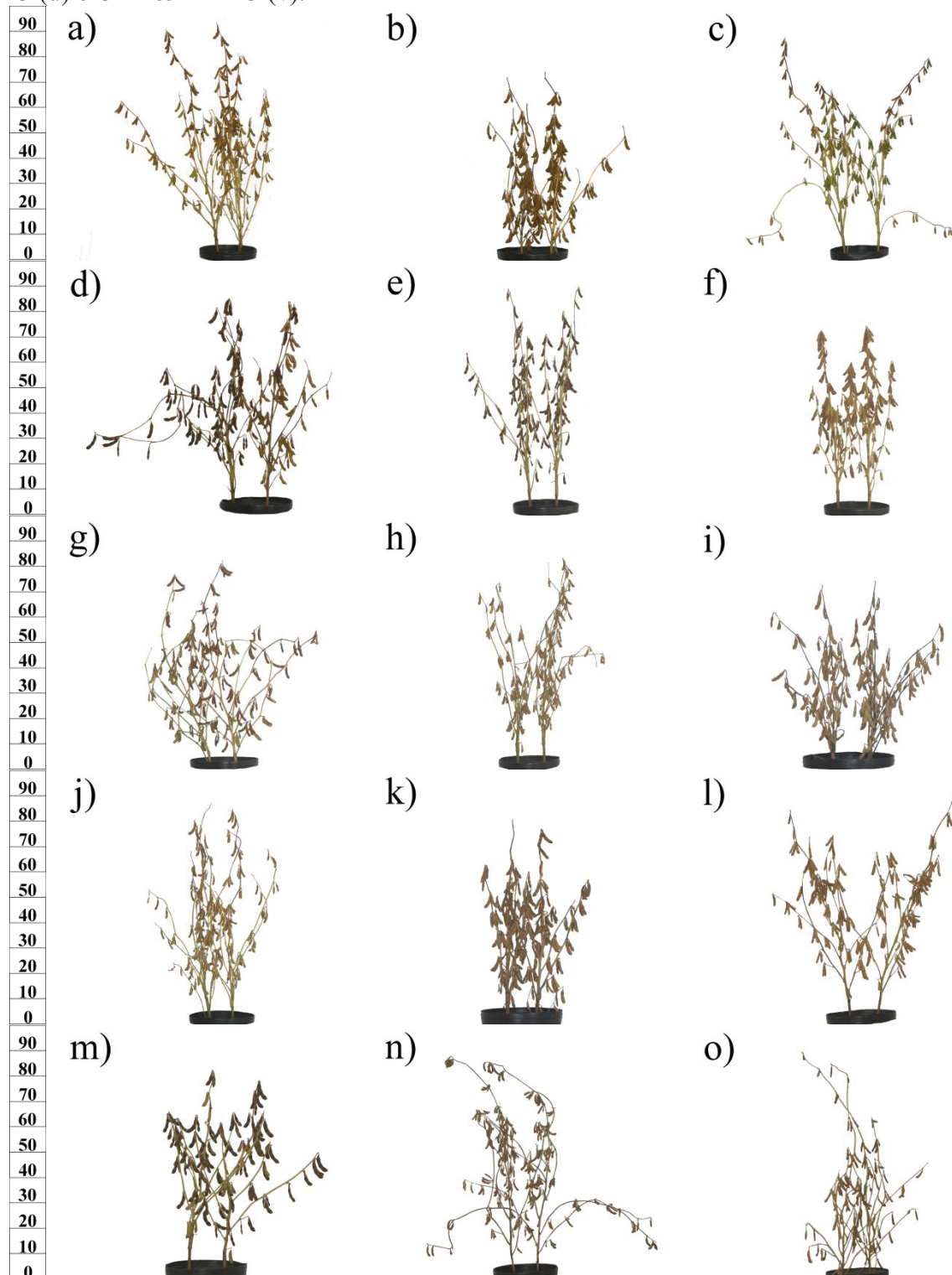


90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0



## APÊNDICE 2 - ESTRUTURA DAS CULTIVARES DE SOJA CULTIVADAS NO SUL DO BRASIL.

Registradas no estágio de maturidade fisiológica, tendo como escala de comparação régua graduada em centímetros. Em ordem cronológica, partindo da cultivar mais antiga, Amarela Comum (a), Bienville (b), Santa Rosa (c), Bragg (d), Flórida (e), São Luiz (f), Bossier (g), BR-4 (h), CEP-12 (i), Cambará (j), BR-16 (k), FT-Abyara (l), FT-Saray (m), Fepagro RS-10 (n), CD 202 (o), CD 216 (p), CD 214 RR (q), CD 219 RR (r), BRS ativa RR (s), TMG 1066 RR (t), CD 202 RR (u), CD 2590 IPRO (v) e CD 2694 IPRO (w).





90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

p)



q)



r)



s)



t)



u)



v)

